

# Robotski sustav za identifikaciju i lokalizaciju brodova u marini

---

**Dragičević, Nino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:854505>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Nino Dragičević**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Marko Švaco, mag. ing. mech.

Dr. sc. Ante Bakić, dipl. ing.

Student:

Nino Dragičević

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Marku Švaci i asistentici Tari Knežević na dostupnosti i konstruktivnim kritikama tijekom izrade diplomskog rada te asistentu Branimiru Čaranu za pruženu pomoć s Optitrack sustavom.

Veliko hvala tvrtki Probotica d.o.o. za pribavljanje potrebne opreme korištene u ovom radu i veliko hvala kolegama koji su pružali ugodnu radnu atmosferu.

Naposljetku, zahvalio bih se kolegama s fakulteta, prijateljima i obitelji na moralnoj podršci i vjerovanju u mene tokom cijelog studija.

Nino Dragičević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nino Dragičević** JMBAG: 0035220251

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Robotski sustav za identifikaciju i lokalizaciju brodova u marini**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Robotic system for identification and localization of ships in a marina**

Opis zadatka:

U okviru ovog diplomskog rada potrebno je razviti sustav za identifikaciju brodova u marini koristeći radio (RF – eng. *Radio frequency*) tehnologije u kombinaciji s postojećim autonomnim mobilnim robotom. Cilj rada je razvoj i implementacija robusnog, pouzdanog i efikasnog sustava za identifikaciju i lokalizaciju brodova, kao jedne od osnova pametnog sustava upravljanja nautičkom marinom. Predmet istraživanja uključuje odabir RF tehnologije, razvoj programske podrške za odabrani prijamnik, te integraciju sustava s postojećim autonomnim mobilnim robotom. Izvršavajući zadatak patroliranja, mobilni robot treba prikupljati i obrađivati podatke s predajnika na brodovima u svrhu lokalizacije i identifikacije brodova na vezovima. S obzirom na specifične izazove kao što su različiti uvjeti prijenosa signala u okruženju marine i potrebe za preciznom lokalizacijom brodova, rad treba obuhvatiti razvoj sustava za obradu signala s ciljem procjene udaljenosti i smjera iz kojeg signal dolazi.

U sklopu diplomskog rada potrebno je:

- istražiti dostupne RF tehnologije i odabrati najprikladniju za implementaciju u okruženju marine
- napraviti pregled tržišta i odabrati prikladnu hardversku platformu za implementaciju odabrane RF tehnologije
- implementirati algoritam za identifikaciju i određivanje pozicije brodova u odnosu na mobilnog robota
- integrirati algoritam kako bi bio kompatibilan s postojećim mobilnim robotom koristeći Robotski operativni sustav (ROS2)
- eksperimentalno validirati sustav u stvarnim uvjetima s ciljem evaluacije performansi, točnosti identifikacije i analize pouzdanosti.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:  
9. svibnja 2024. 11. srpnja 2024. 15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao: Komentor: Predsjednik Povjerenstva:  
Doc. dr. sc. Marko Švaco dr. sc. Ante Bakić Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	IX
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY .....	XIV
1. UVOD.....	1
1.1. Pristup zadatku .....	3
2. BEŽIČNE TEHNOLOGIJE .....	5
2.1. Radio tehnologije i vrste antena.....	5
2.2. WiFi bežična tehnologija .....	8
2.3. Identifikacija pomoću radio frekvencije - RFID.....	10
2.4. ZigBee protokol i dugodometna bežična tehnologija - LoRa.....	11
2.5. Bluetooth niske energije - BLE.....	12
2.6. Ultra-širokopolasna bežična tehnologija - UWB .....	13
2.7. Usporedba bežičnih tehnologija.....	15
3. BLUETOOTH NISKE ENERGIJE - TEHNOLOGIJA .....	19
3.1. Stog Bluetooth-a niske energije .....	20
3.2. Paketi Bluetooth-a niske energije .....	29
3.3. Topologije mreža Bluetooth-a niske energije .....	32
4. OSNOVE ODREĐIVANJA SMJERA SIGNALA .....	35
4.1. Ekstenzija konstantnog tona Bluetooth-a niske energije .....	37
4.2. Trivijalno rješenje .....	38
4.4. Algoritmi traženja smjera dolaska .....	40
4.4.1. Classical Beamformer algoritam.....	43
4.4.2. MUSIC algoritam.....	43

---

4.4.3. ESPRIT algoritam .....	46
5. ODABRANI HARDVER.....	47
5.1. Prijamnik.....	49
5.2. Odašiljač.....	51
6. IMPLEMENTACIJA ROBOTSKOG SUSTAVA ZA IDENTIFIKACIJU I LOKALIZACIJU BRODOVA .....	53
6.1. Ko-procesorski način rada .....	54
6.2. Identifikacija odašiljača u Robotskom operacijskom sustavu 2 - ROS2 .....	55
6.3. Izračun pozicije .....	57
6.4. Filter indikatora jačine dobivenog signala - RSSI .....	59
7. TESTNI POSTAV .....	61
8. REZULTATI .....	64
8.1. Mjerenje kuta dolaska .....	64
8.2. Mjerenje udaljenosti pomoću indikatora jačine dobivenog signala.....	66
8.3. Mjerenje točnosti identifikacije odašiljača .....	68
8.4. Mjerenje točnosti lokalizacije .....	73
8.5. Poboljšanja sustava .....	75
9. ZAKLJUČAK.....	78
LITERATURA.....	79

## POPIS SLIKA

Slika 1. Marconijev bežični telegraf [1].....	1
Slika 2.a Spot robot [2] .....	2
Slika 2.b UGV Husky mobilni robot [3].....	2
Slika 3. Koncept mobilnog robota predviđenog za korištenje sa sustavom za identifikaciju i lokalizaciju brodova .....	3
Slika 4.a Identifikacija brodova prema jačini signala .....	4
Slika 4.b Identifikacija brodova prema smjeru signala .....	4
Slika 5. Prikaz elektromagnetskog spektra [7].....	6
Slika 6. Razne vrste antena [9].....	7
Slika 7. Dijagrami zračenja raznih antena u 3D [10] .....	8
Slika 8. Trokut formiran pomoću dobivenih udaljenosti [12].....	9
Slika 9. Jednostavna struktura i razne veličine pasivnih RFID odašiljača [13] .....	10
Slika 10. Sustav za lokalizaciju pomoću mreže RFID odašiljača [15] .....	11
Slika 11. Raspored komunikacijskih kanala ZigBee tehnologije [16] .....	11
Slika 12. Usporedba raspona radnih frekvencija [25] .....	14
Slika 13. Apple AirDrop i AirTag [27] .....	14
Slika 14. AoA + ToF [28] .....	15
Slika 15. Ortofoto marine Puntat.....	17
Slika 16. FSC-BP104 BLE 5.1 odašiljač [35].....	18
Slika 17. Radna frekvencija BLE [36] .....	19
Slika 18. Prikaz BLE stoga [38].....	20
Slika 19. Pasivno skeniranje [38] .....	21
Slika 20. Aktivno skeniranje [38] .....	22
Slika 21. Uspostava BLE veze [38] .....	23
Slika 22. Uloge uređaja [38] .....	24
Slika 23. Prijenos podataka sa i bez ACK [38] .....	26
Slika 24. Struktura GATT [38] .....	27
Slika 25. Struktura LE Uncoded PHY paketa [40] .....	29
Slika 26. PDU fizičkog kanala oglašavanja [40].....	31
Slika 27. Zaglavlje PDU fizičkog kanala oglašavanja [40] .....	31
Slika 28. PDU fizičkog kanala podataka [41] .....	31



Slika 29. Zaglavlje PDU fizičkog kanala podataka [41] .....	32
Slika 30. Primjer topologije BLE mreže [38] .....	33
Slika 31. Promjena topologije BLE mreže [38] .....	34
Slika 32. Estimacija kuta dolaska [42] .....	35
Slika 33. Estimacija kuta odlaska [42] .....	36
Slika 34. Različite konfiguracije nizova antena [42] .....	37
Slika 35. Kut azimuta i elevacije [42] .....	37
Slika 36. Valna duljina [44] .....	38
Slika 37. Kut signala [42].....	39
Slika 38. Projekcije dobivene IQ uzorkovanjem [45] .....	40
Slika 39. Model za DoA estimaciju s ULA i $d$ broja izvora signala [46] .....	41
Slika 40. Estimacija DOA s MUSIC algoritmom, smjerovi radio signala su $10^\circ$ , $20^\circ$ i $40^\circ$ [46] .....	45
Slika 41. Dusan IoT AoA BLE lokator [48] .....	47
Slika 42.a Nordic nRF5340 DK [50] .....	47
Slika 42.b CoreHW ANT1-1.0 [51] .....	47
Slika 43. U-blox XPLR-AOA-1 kit [32].....	48
Slika 44. SiliconLabs AoA komplet [49] .....	49
Slika 45. Shema komunikacije mikrokontrolera i URA [55].....	50
Slika 46.a Dijagram zračenja, $\varphi$ smjer [56].....	50
Slika 46.b Dijagram zračenja, $\theta$ smjer [56].....	50
Slika 47. Blok-dijagram BGM220 [59].....	51
Slika 48. BGM220 napajan pomoću 2x AA baterije .....	52
Slika 49. Prikaz identifikacije brodova .....	53
Slika 50. Prikaz blok-dijagrama softvera .....	54
Slika 51. NCP vs SoC način rada [60] .....	55
Slika 52. Definicija složenog kuta.....	56
Slika 53. Struktura ROS2 implementacije sustava.....	56
Slika 54. Definicija koordinatnog sustava BRD4191A .....	57
Slika 55. Standardna definicija sfernog koordinatnog sustava [63].....	57
Slika 56.a Kamere <i>Optitrack</i> -a u CRTA-i, 1. pogled [67] .....	61
Slika 56.b Kamere <i>Optitrack</i> -a u CRTA-i, 2. pogled [67].....	61
Slika 57. ASTRO robot s montiranim senzorom i <i>Optitrack</i> markerima.....	62
Slika 58.a CAD model stalka za senzor .....	62

---

Slika 58.b 3D isprintani stalak za senzor .....	62
Slika 59. Test detekcije i identifikacije odašiljača .....	63
Slika 60. Test lokalizacije odašiljača .....	63
Slika 61. Rezultati mjerenja kuta dolaska - azimut .....	64
Slika 62. Rezultati mjerenja kuta dolaska – elevacija .....	65
Slika 63.a CDF graf rezultata mjerenja azimuta .....	66
Slika 63.b CDF graf rezultata mjerenja elevacije .....	66
Slika 64. Rezultati mjerenja RSSI.....	67
Slika 65. Varijanca mjerenja naspram udaljenosti .....	67
Slika 66. Krivulja matematičkog modela relacije udaljenosti i RSSI vrijednosti pronađena pomoću <i>scipy.optimize.curve_fit</i> .....	68
Slika 67. Zone u testu identifikacije.....	69
Slika 68. Test identifikacije, povezani način rada.....	70
Slika 69. Test identifikacije, nepovezani način rada.....	70
Slika 70. Test identifikacije, način rada periodičkog oglašavanja .....	71
Slika 71. Usporedba točnosti različitih načina rada kod testa identifikacije.....	72
Slika 72. Test identifikacije, način rada periodičkog oglašavanja, zakrivljena trajektorija.....	72
Slika 73. Test lokalizacije, smjer okomito na kalibraciju RSSI, način rada periodičkog oglašavanja .....	73
Slika 74. Test lokalizacije u smjeru kalibracije RSSI, način rada periodičkog oglašavanja....	74
Slika 75.a CDF graf, lokalizacija okomito na smjer kalibracije RSSI.....	74
Slika 75.b CDF graf, lokalizacija u smjeru kalibracije RSSI.....	74

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Pregled raznih IEEE 802.11 standarda [11] .....	8
Tablica 2. Različiti PHY slojevi BLE 5.0+ tehnologije [21] .....	13
Tablica 3. Usporedba bežičnih tehnologija [6] .....	16
Tablica 4. Primjer atributa [38] .....	24
Tablica 5. Metode ATT protokola [38] .....	25
Tablica 6. Načini rada BLE uređaja definirani GAP-om [38] .....	28
Tablica 7. Procedure definirane GAP-om [38] .....	28
Tablica 8. Karakteristike BLE CTE servisa [43] .....	38
Tablica 9. Usporedba XPLR-AOA-3 i BG22-PK6022A .....	48
Tablica 10. Specifikacije EFR32-BG22C224F512IM40 [54] .....	49
Tablica 11. Maksimalna pogreška, prosječna pogreška, kvadratna srednja pogreška i standardna devijacija lokalizacije.....	75

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$f$	Hz	Frekvencija
$\lambda$	m	Valna duljina
$c$	m/s	Brzina svjetlosti
$s$	m	Prijeđeni put
$ToF$	s	<i>Time-of-Flight</i>
$\varphi(t)$	°/rad	Faza signala
$\theta$	°/rad	Kut azimuta
$\varphi$	°/rad	Kut elevacije
$\psi$	°/rad	Razlika u fazi signala
$\tau$	s	Kašnjenje signala
$t$	s	Vrijeme
$s_i(t)$	-	Signal fazora
$\alpha_i(t)$	-	Amplituda fazora
$\beta_i(t)$	-	Faza fazora
$\Delta_{mi}$	m	Udaljenost od valne fronte signala do m-te antene
$\Delta$	m	Udaljenost između antena
$m$	-	Redni broj antene
$M$	-	Ukupan broj antena
$\mu_i$	$m^{-1}$	Prostorna frekvencija i-tog člana
$d$	-	Redni broj izvora signala
$n_m(t)$	-	Signal šuma na m-toj anteni
$\mathbf{x}(t)$	-	Vektor stupac podataka
$\mathbf{s}(t)$	-	Vektor stupac signala
$\mathbf{n}(t)$	-	Vektor šuma
$\mathbf{a}(\mu_i)$	-	Vektor skretanja
$\mathbf{A}$	-	Matrica skretanja niza antena
$\mathbf{I}_M$	-	Matrica identiteta veličine M x M
$\sigma_N$	-	Varijanca šuma
$\mathbf{w}$	-	Težinski vektor
$P(\mathbf{w})$	dB	Ukupna prosječna snaga

---

$N$	-	Broj snimaka podataka
$\mathbf{R}_{xx}$	-	Matrica kovarijanci
$\mathbf{R}_{ss}$	-	Matrica korelacije signala
$\lambda_i$	-	I-ta svojstvena vrijednost matrice kovarijanci
$\mathbf{q}_i$	-	I-ti svojstveni vektor i-te svojstvene vrijednosti
$\mathbf{V}_n$	-	Matrica potprostora šuma
$r$	m	Radijalna udaljenost sfernih koordinata
$P_R$	dBm	Primljena snaga
$A$	dBm	Izmjerena snaga na referentnoj udaljenosti
$\eta$	-	Transmisijski faktor
$\delta$	°/rad	Složeni kut

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
ACK	<i>Acknowledgement</i> – mehanizam kojim se služi BLE softverski stog
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> – enkripcijski standard
AFH	<i>Adaptive Frequency Hopping</i> – mehanizam promjene frekvencije kojim se služi BLE
AGC	<i>Automatic Gain Control</i> – automatska kontrola pojačanja prijammnika
AoA	<i>Angle of Arrival</i> – kut dolaska signala
AoD	<i>Angle of Departure</i> – kut odlaska signala
AP	<i>Access Point</i> – pristupna točka
ASTRO	<i>Autonomous System for Teaching Robotics</i> – mobilni robot razvijen u CRTA-i
ATT	<i>Attribute</i> – dio BLE softverskog stoga
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> – vrsta šuma u signalu
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> – vrsta Bluetooth bežične tehnologije s niskom potrošnjom energije
Bluetooth BR/EDR	<i>Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate</i> – regularna Bluetooth bežična tehnologija
Bluetooth SIG	<i>Bluetooth Special Interest Group</i> – organizacija koja se bavi razvojem Bluetooth tehnologije
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> – funkcija kumulativne distribucije podataka
CP	<i>CTEInfo Present</i> – polje BLE paketa
CPU	<i>Central Processing Unit</i> – glavni procesor
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> – način provjere integriteta podataka
CRTA	<i>Regional Centre of Excellence for Robotic Technology</i> – Regionalni centar izvrsnosti za robotske tehnologije
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> – način odašiljanja signala

---

CTE	<i>Constant Tone Extension</i> – nemodulirani signal na kraju BLE paketa
DF	<i>Direction Finding</i> – traženje smjera signala
DK	<i>Development Kit</i> – razvojni komplet
DOA	<i>Direction Of Arrival</i> – smjer dolaska signala
DR	<i>Dead Reckoning</i> – algoritam za računanje trenutne pozicije objekta u pokretu
EHF	<i>Extra High Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
ESPRIT	<i>Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique</i> – jedan od algoritama za računanje smjera dolaska signala
GAP	<i>Generic Access Profile</i> – dio BLE softverskog stoga
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i> – dio BLE softverskog stoga
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> – vrsta modulacije signala
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i> – satelitski navigacijski sustav kojeg je razvio Sovjetski Savez
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i> – pinovi na procesoru koji se mogu koristiti kao ulaz ili izlaz
GPS	<i>Global Positioning System</i> – satelitski navigacijski sustav kojeg su razvile Sjedinjene Američke Države
HCI	<i>Host-Controller Interface</i> – dio BLE softverskog stoga
HF	<i>High Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> – najveća svjetska organizacija za unaprjeđivanje tehnologije
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> – uređaj koji mjeri akceleraciju i orijentaciju
IoT	<i>Internet of Things</i> – pojam za mrežu povezanih uređaja raznih vrsta
IQ	<i>In-phase, Quadrature-phase</i> – dvije sinusoide kojima je razlika u fazi 90°
ISM	<i>Industrial Scientific Medical</i> – frekvencijski pojasi namjenjeni za industrijsku, znanstvenu i medicinsku primjenu
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> – vrsta zaslona

---

LF	<i>Low Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
LL	<i>Link Layer</i> – dio BLE softverskog stoga
LoRa	<i>Long Range</i> – vrsta bežične tehnologije
LoS	<i>Line of Sight</i> – vidno polje
LSB	<i>Least Significant Bit</i> – najmanje značajan bit
L2CAP	<i>Logical Link Control and Adaptation Protocol</i> – dio BLE softverskog stoga
MD	<i>More Data</i> – polje BLE paketa
MF	<i>Middle Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
MIC	<i>Message Integrity Check</i> – polje BLE paketa
MiTM	<i>Man in The Middle</i> – vrsta sigurnosnog napada kod bežičnih tehnologija
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> – sustav s nekoliko ulaza i nekoliko izlaza
MRC	<i>Maximum Ratio Combiner</i> – metoda kombiniranja podataka
MSB	<i>Most Significant Bit</i> – najznačaniji bit
MUSIC	<i>Multiple Signal Classification</i> – jedan od algoritama za računanje smjera dolaska signala
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i> – protokol slanja poruka
NCP	<i>Network Co-Processor</i> – način rada prijammika
NESN	<i>Next Expected Sequence Number</i> – polje BLE paketa
PBR	<i>Phase Based Ranging</i> – metoda računanja udaljenosti pomoću razlike u fazi signala
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> – tiskana pločica
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> – polje BLE paketa
PHY	<i>Physical Layer</i> – dio hardvera zaslužan za kontrolu odašiljanja BLE signala
PLA	<i>Polyactic Acid</i> – poliaktička kiselina
QoS	<i>Quality of Service</i> – opis ukupne izvedbe usluge



---

RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i> – uređaj za određivanje prisutnosti objekata
RAM	<i>Random Access Memory</i> – radna memorija
RF	<i>Radio Frequency</i> – radio tehnologije
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> – vrsta bežične tehnologije
RFU	<i>Reserved for Future Use</i> – polje BLE paketa
ROS2	<i>Robot Operating System 2</i> – robotski operacijski sustav 2
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> – indikator jačine dobivenog signala
RTL	<i>Real Time Location</i> – biblioteka korištena za implementaciju sustava
RX	<i>Receive</i> – zaprimanje
SHF	<i>Super High Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
SM	<i>Security Manager</i> – dio BLE softverskog stoga
SN	<i>Sequence Number</i> – polje BLE paketa
SoC	<i>System on Chip</i> – način rada odašiljača
ToF	<i>Time of Flight</i> – metoda računanja udaljenosti pomoću vremena putovanja signala
TX	<i>Transmit</i> – odašiljanje
UCA	<i>Uniform Circular Array</i> – vrsta niza antena
ULA	<i>Uniform Linear Array</i> – vrsta niza antena
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
URA	<i>Uniform Radial Array</i> – vrsta niza antena
UUID	<i>Universal Unique Identifier</i> – univerzalno jedinstveni identifikator
VHF	<i>Very High Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
VLF	<i>Very Low Frequency</i> – frekvencijski pojas u spektru radiovalova
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> – vrsta bežične tehnologije
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> – lokalna mreža zasnovana na bežičnim tehnologijama
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> – bežične mreže senzora
UWB	<i>Ultra Wideband</i> – vrsta bežične tehnologije

## SAŽETAK

Posljednjih godina javlja se sve veća potreba za učinkovitim upravljanjem i povećanim nadzorom u različitim sektorima industrije. Brzim razvojem bežičnih tehnologija omogućena je implementacija naprednih sustava za lokalizaciju objekata. Zadatak ovog diplomskog rada je odabrati odgovarajuću bežičnu tehnologiju i razviti sustav za identifikaciju i lokalizaciju brodova u pametnoj marini. Sustav identifikacije osmišljen je za korištenje s autonomnim mobilnim robotom. Pomoću prijamnika montiranog na mobilnog robota prikupljaju se informacije o smjeru dolaska signala s odašiljača koji se nalaze na brodovima, koristeći Bluetooth niske energije. Na temelju informacija o smjeru dolaska signala, uz poznatu poziciju mobilnog robota, vrši se identifikacija brodova. Kombinirajući podatke o smjeru dolaska signala s jednom od metoda mjerenja udaljenosti, moguće je odrediti lokaciju odašiljača na brodovima u odnosu na poziciju mobilnog robota. U uvodu rada objašnjena je problematika i detaljno opisan zadatak, a potom je prezentirana potrebna teorija bežičnih tehnologija i algoritama za traženje smjera signala. Zatim je opisana implementacija sustava koristeći *SiliconLabs* BRD4191A BLE prijamnik i *SiliconLabs* BGM220 odašiljače. Naposljetku, prikazani su i komentirani dobiveni rezultati te je donesen prikladan zaključak.

Ključne riječi: pametna marina, mobilni robot, Bluetooth niske energije, lokalizacija i identifikacija brodova

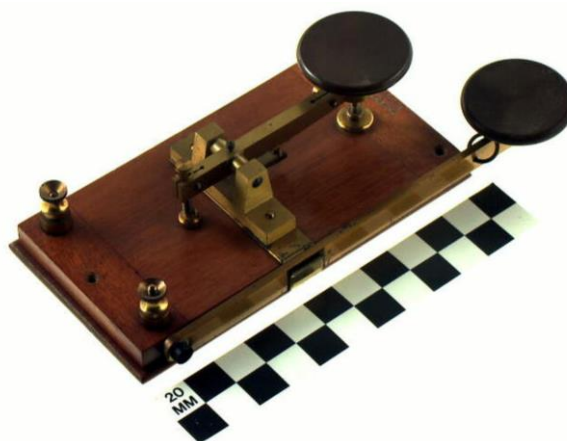
## **SUMMARY**

In recent years, there has been a growing need for efficient management and increased monitoring in various industrial sectors. The rapid development of wireless technologies has enabled the implementation of advanced object localization systems. The task of this master thesis is to select an appropriate wireless technology and develop a system for the identification and localization of ships in a smart marina. The identification system is designed to be used in combination with an autonomous mobile robot. Using a receiver mounted on the mobile robot, information about the direction of arrival of signals from transmitters located on the ships is collected using Bluetooth Low Energy. Based on the information about the direction of arrival of the signal, along with the known position of the mobile robot, the ships are identified. By combining the direction of arrival data with one of the range finding methods, it is possible to determine the location of the transmitters on the ships relative to the position of the mobile robot. The introduction to the thesis explains the problem and describes the task in detail, followed by a presentation of the necessary theory of wireless technologies and direction-finding algorithms. Then, the implementation of the system using the SiliconLabs BRD4191A BLE receiver and SiliconLabs BGM220 transmitters is described. Finally, the obtained results are presented and commented on, and an appropriate conclusion is drawn.

**Keywords:** smart marina, mobile robot, Bluetooth Low Energy, localization and identification of ships

## 1. UVOD

Sustavi identifikacije i lokalizacije koriste se u svrhu određivanja identiteta i pozicije objekata, ljudi ili uređaja u prostoru. Njima je omogućeno precizno praćenje, upravljanje i nadzor za efikasno vođenje i donošenje odluka u različitim granama industrije. Potreba za ovakvim sustavima javlja se rano u povijesti čovječanstva. Još u doba antike, pomorci su određivali poziciju i smjer kretanja svoga broda pomoću nebeskih tijela, kopnenih orijentira ili nautičkih karata. Suočavali su se s konstantnim problemima identifikacije neprijateljskih od prijateljskih brodova, koja se vršila proučavanjem arhitekture broda, njegove zastave ili promatranjem uniforma posade na brodu. Početkom 20. stoljeća započinje korištenje prvih bežičnih komunikacijskih sustava, kao što je npr. Marconijev bežični telegraf korišten na Titanicu. Marconijev bežični telegraf (slika 1.) komunicirao je transmisijom kratkih i dugačkih pulseva radiovalova koristeći se Morse-ovim kodom za dekodiranje poruka. Telegraf je, između ostalog, služio i za identifikaciju brodova.



**Slika 1. Marconijev bežični telegraf [1]**

Prvi sustavi za lokalizaciju i praćenje javili su se za vrijeme drugog svjetskog rata. RADAR (*engl. Radio Detection and Ranging*) sustavi su pomoću radiovalova detektirali i pratili letjelice i brodove. Poslije rata, tehnološki napredak u radarskoj tehnologiji omogućio je njegovo korištenje u meteorološke svrhe i za svrhe kontrole leta.

Svemirskom utrkom između SAD-a i Sovjetskog Saveza u drugoj polovici 20. stoljeća započela je revolucija tehnologija pozicioniranja. Razvojem globalnih navigacijskih satelitskih sustava kao što su američki GPS (*engl. Global Positioning System*), sovjetski GLONASS (*engl. Global Navigation Satellite System*), europski Galileo i kineski BeiDou, omogućeno je precizno pozicioniranje triangulacijom satelitskih signala. Početkom 21. stoljeća, bežične tehnologije postale su sveprisutne. Razvojem raznih bežičnih komunikacijskih protokola kao što su WiFi,

Bluetooth, LoRa ili ZigBee, uz značajne napretke u senzorskoj tehnologiji moguće je implementirati precizne sustave za identifikaciju i lokalizaciju čak i na prostorima gdje je GPS signal onemogućen. Također, neke bežične tehnologije nude nižu potrošnju energije u odnosu na GPS, neke su jeftinije ili preciznije od GPS-a, a neke je lakše implementirati.

Robotika je multidisciplinarna znanost koja uključuje dizajn, konstrukciju, rad te korištenje robota. Pojam robot odnosi se na stroj koji je moguće programirati tako da izvršava svoje zadatke autonomno ili poluautonomno. Mobilni roboti su, uz izvršavanje spomenutih zadataka, sposobni kretati se i djelovati u različitim okolinama. Oni sadrže senzore i aktuatorne koji služe za interakciju s promjenjivim okolinama kroz koje se kreću. Senzori mobilnim robotima služe za percepciju i navigaciju, dok aktuatori služe za njihovo pokretanje. Mobilnim robotima upravlja programabilna upravljačka jedinica koja sa sensorima i aktuatorima komunicira pomoću komunikacijskog protokola. Mobilni roboti različitih su oblika i veličina, a kreću se pomoću kotača, gusjenica, nogu, propelera, itd. (slika 2.a, 2.b).



**Slika 2.a Spot robot [2]**



**Slika 2.b UGV Husky mobilni robot [3]**

Mobilni robot predviđen za korištenje sa sustavom za identifikaciju i lokalizaciju brodova kretat će se pomoću četiri kotača i bit će potpuno autonoman. Koncept mobilnog robota koji je trenutno u fazi razvoja prikazan je na slici 3.



**Slika 3. Koncept mobilnog robota predviđenog za korištenje sa sustavom za identifikaciju i lokalizaciju brodova**

### 1.1. Pristup zadatku

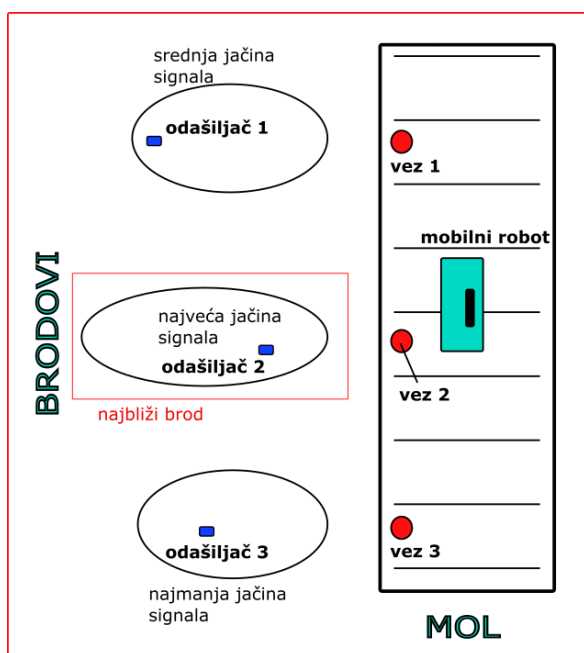
Zadatak ovog diplomskog rada je razviti sustav za pouzdanu identifikaciju i lokalizaciju brodova u marini. Ideja je da se mobilni robot koristi za detekciju uljeza ili požara u marini i transport prtljage gostiju po molovima marine od njihovog broda do izlaza iz marine. Svaki stalni gost marine registracijom u marinu dobiva predodređeni vez za brod. Nakon pristajanja broda, robotski će sustav identificirati brod i provjeriti nalazi li se brod na svom predodređenom vezu.

U istraživanju T. Savić i sur. [4] implementiran je sličan sustav identifikacije brodova koristeći signale odašiljača na brodovima i prijammike montirane na svakom vezu. Logika predloženog sustava je jednostavna: prijammici montirani na vezovima određuju na kojem vezu se nalazi koji brod na temelju jačine signala koje dobivaju s odašiljača na brodovima. Međutim, ideja robotskog sustava za identifikaciju brodova je eliminirati pojedinačne prijammike montirane na svaki vez i koristiti jedan mobilni prijammik montiran na mobilnog robota. Zbog potrebe korištenja samo jednog prijammika sustav je znatno jeftiniji.

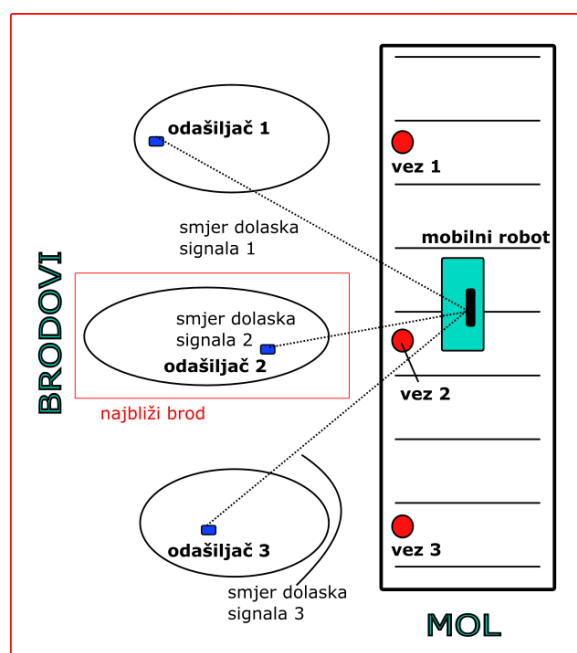
S druge strane, sustav mora biti dovoljno precizan za točnu identifikaciju brodova i zbog toga je potrebno odabrati dovoljno robusnu bežičnu tehnologiju koja je otporna na razne smetnje u prijenosu signala u marini. Odabir tehnologija je širok: postoje bežične tehnologije koje se koriste primarno za identifikaciju, kao što su RFID ili ZigBee te one koje se koriste i za

lokalizaciju, kao što su UWB ili BLE. Nadalje, postoje bežične tehnologije kao što je WiFi, čija je primarna upotreba pružanje internetske veze uređajima, ali se može koristiti i u svrhu lokalizacije i identifikacije.

Precizna pozicija mobilnog robota kao i prijarnika montiranog na njega poznata je u svakom trenutku pomoću GPS-a, dok se odašiljača nalazi na svakom brodu. Ideja sustava je sljedeća: ako je poznata jačina signala odašiljača (pomoću tehnologija kao što su RFID ili ZigBee) ili ako je poznat smjer dolaska signala (pomoću tehnologija kao što je BLE ili UWB), moguće je estimirati koji brod je trenutno najbliži mobilnom robotu (slika 4.a i 4.b). Ta estimacija može se zatim provjeriti približnom lokalizacijom tog broda.



Slika 4.a Identifikacija brodova prema jačini signala



Slika 4.b Identifikacija brodova prema smjeru signala

U nastavku rada predstaviti će se navedene bežične tehnologije, istražiti mogućnost njihove implementacije te odabrati ona prikladna za izvršavanje zadanog zadatka. Kod odabira će se obratiti posebna pozornost na cijenu, robusnost, jednostavnost implementacije, potrošnju energije, domet i preciznost tehnologije.

## 2. BEŽIČNE TEHNOLOGIJE

Bežične tehnologije odnose se na tehnologije koje omogućuju komunikaciju između više uređaja preko zraka (*engl. Over-the-air*), odnosno bez upotrebe kablova. Prema doletu, dijele se na one dugog dometa i kratkog dometa. Jedne od najpoznatijih bežičnih tehnologija dugog dometa su mobilne mreže. Trenutno, upotreba mobilnih uređaja nadmašuje upotrebu tradicionalnih računala [5]. Iz tog razloga industrija bežičnih tehnologija sklona je razvoju prema sve većim brzinama prijenosa podataka (kao što je npr. nedavni 5G), ali i kreiranju pouzdane komunikacije u svim uvjetima.

Evoluciju dugodometnih bežičnih tehnologija u stopu prate i one kratkometne. Sve više se javlja upotreba takvih tehnologija u industrijama kao što su industrijska automatizacija (mreže senzora, pametna skladišta), zdravstvo, građevina (pametne kuće), automobilska industrija, sport (pametni satovi), *internet of things* (IoT) i dr. Glavni ciljevi razvoja kratkometnih tehnologija obuhvaćaju što kompaktnije čipove i što veću energetska efikasnost.

Trenutno najrasprostranjenija tehnologija za praćenje lokacije i pozicioniranje je GPS (*engl. Global Positioning System*). GPS je sposoban pružiti preciznu lokaciju triangulacijom signala kojeg prijamnik (*engl. locator*) dobiva pomoću više satelita odjednom. S druge strane, GPS nije precizan u zatvorenim prostorima gdje nema direktne vidljivosti (LoS *engl. Line of Sight*) između antene i satelita [6]. Osim toga, precizni GPS čipovi skupi su i ne funkcioniraju dobro u slučajevima gdje brojni objekti mogu reflektirati, raspršiti ili apsorbirati signal.

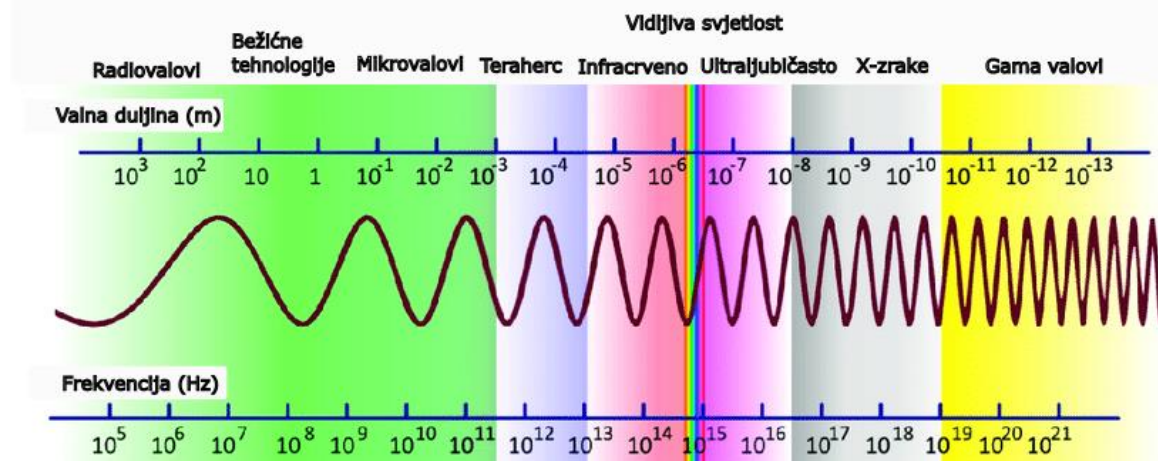
Zbog sve većih zahtjeva za praćenjem lokacije objekata u okolinama gdje GPS signal nije dostupan ili je oslabljen, razvoj kratkometnih bežičnih tehnologija omogućio je i razvoj raznih sustava za lokalizaciju koji se na njima temelje. Ti novi sustavi za lokalizaciju su nerijetko jeftiniji i energetska efikasniji od GPS-a, ali variraju u preciznosti.

U nastavku će biti objašnjeni osnovni fizikalni pojmovi komunikacijskih bežičnih tehnologija te će biti prikazan kratak pregled relevantnih kratkometnih bežičnih tehnologija.

### 2.1. Radio tehnologije i vrste antena

Radio tehnologije (RF – *engl. Radio frequency*) pripadaju u bežične tehnologije koje koriste radiovalove za prijenos informacija kroz određeni medij, kao što je npr. zrak ili vakuum. Ti radiovalovi pripadaju spektru elektromagnetskih valova određene valne duljine i frekvencije. Frekvencija  $f$  radiovalova najniža je od svih valova elektromagnetskog spektra, tipično niža od 300 GHz, a njihova valna duljina  $\lambda$  je najveća, tipično veća od 1 mm (slika 5.). Radiovalovi, kao i svi elektromagnetski valovi, putuju brzinom svjetlosti  $c$ .





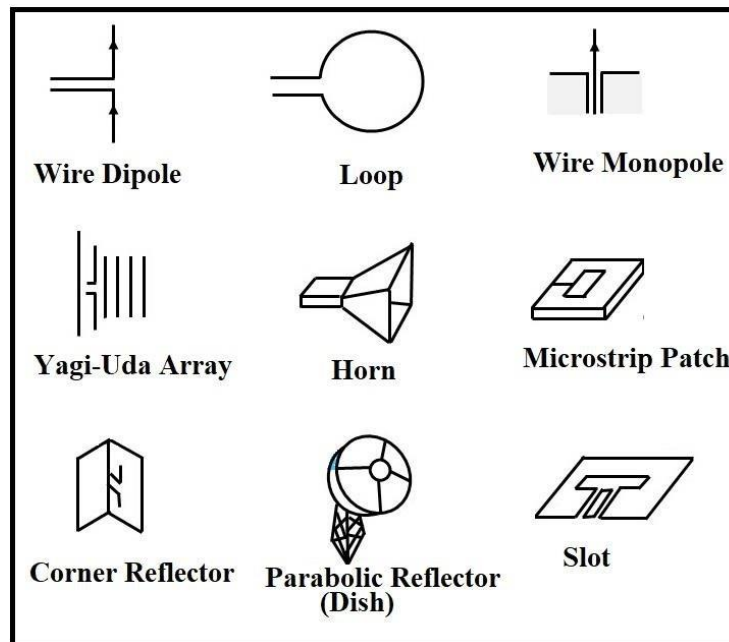
Slika 5. Prikaz elektromagnetskog spektra [7]

Spektar samih radiovalova, koji se prostire od 3 kHz do 300 GHz, dijeli se prema svojim karakteristikama i primjenama:

- VLF (*engl. Very Low Frequency*) – 3 kHz do 30 kHz – podvodna komunikacija
- LF (*engl. Low Frequency*) – 30 kHz do 300 kHz – radio, radijski satovi, radio navigacija
- MF (*engl. Medium Frequency*) – 300 kHz do 3 MHz – radio
- HF (*engl. High Frequency*) – 3 MHz do 30 MHz – radio
- VHF (*engl. Very High Frequency*) – 30 MHz do 300 MHz – radio, televizija, radar
- UHF (*engl. Ultra High Frequency*) – 300 MHz do 3 GHz – televizija, bežična komunikacija, mobilne mreže, mikrovalna peć
- SHF (*engl. Super High Frequency*) – 3 GHz do 30 GHz – radar, satelitska televizija
- EHF (*engl. Extremely High Frequency*) – 30 GHz do 300 GHz – usmjerene veze

Najviše bežičnih tehnologija nalazi se u UHF dijelu spektra radiovalova, na 2,4 GHz, u tzv. ISM (*engl. Industrial Scientific Medical*) pojasu, koja je rezervirana isključivo za netelekomunikacijske primjene.

Zajednička hardverska komponenta koja omogućuje bežičnu komunikaciju svim uređajima neovisno o tome u kojem se pojasu nalaze je antena. Antene pretvaraju električne signale u elektromagnetske valove pri odašiljanju (TX – *engl. Transmit*) te obrnuto pri recepciji (RX – *engl. Receive*). Postoje razne vrste antena ovisno o njihovoj primjeni [8], a neke od njih su žičane antene, dugovalne antene, kratkovalne antene, reflektorske antene, lijevak antene, dipolne antene... (slika 6.).

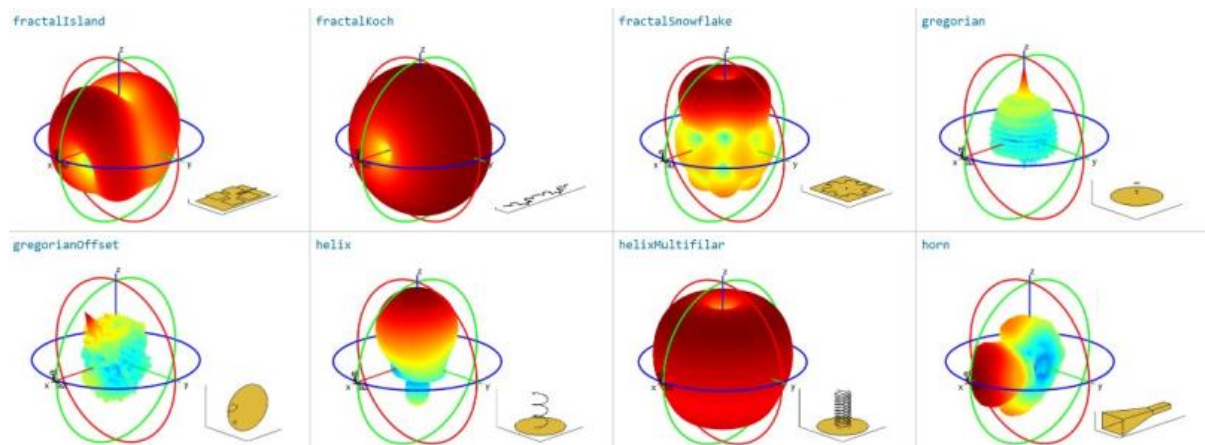


Slika 6. Razne vrste antena [9]

Najvažnija svojstva antena su:

- Pojačanje (*engl. Gain*)
- Frekvencijsko područje (*engl. Bandwidth*)
- Dijagram zračenja (*engl. Radiation Pattern*)
- Polarizacija (*engl. Polarization*)

Pojačanje antene pokazatelj je koliko dobro antena prima ili odašilje signal u određenom smjeru. Veće pojačanje obično znači veću korisnost i veću udaljenost odašiljanja signala. Frekvencijsko područje antene odnosi se na područje u kojem antena može raditi bez značajnih degradacija njenih karakteristika. Veće frekvencijsko područje omogućava povećani prijenos podataka, što je ključno u primjenama kao što su mobilne mreže ili WiFi. Dijagram zračenja antene opisuje raspodjelu njene zračene snage u različitim smjerovima oko antene (slika 7.). Bitan je zbog usmjeravanja antene u pravom smjeru prilikom odašiljanja ili recepcije signala.



Slika 7. Dijagrami zračenja raznih antena u 3D [10]

Polarizacija je orijentacija električnog polja zračenih valova antene. Polarizacija je obično linearna, tj. horizontalna ili vertikalna, ili kružna, tj. lijevokružna ili desnokružna, a neke antene su i dvostruko polarizirane. Polarizacija je bitna kako bi se maksimizirala jačina signala i smanjila interferencija s drugim signalima.

## 2.2. WiFi bežična tehnologija

WiFi (*engl. Wireless Fidelity*) vrsta je bežične komunikacijske tehnologije koja se služi IEEE 802.11 protokolom. WiFi je posvuda: u kućama, parkovima, restoranima, itd. te je kao takav jedna od najrasprostranjenijih vrsta bežične komunikacije. Njegova glavna zadaća je omogućiti mrežnu povezanost mobilnim uređajima emitiranjem radio signala visoke razine snage. Kao takav, WiFi može postići domet i do 100 metara. Brzina WiFi-ja, pa i frekvencija na kojoj radi, određena je njegovim protokolom po IEEE standardu. Radne frekvencije se razlikuju u Europi i SAD-u, gdje iznose od 2,4 GHz do 2,4835 GHz (*ISM* pojas), od onih u Japanu, gdje iznose od 2,471 GHz do 2,497 GHz. Postoji i 5 GHz frekvencijski pojas koji pruža veću brzinu prijenosa podataka, manje interferencije s drugim signalima i bolje performanse u okruženjima s puno mobilnih uređaja.

Tablica 1. Pregled raznih IEEE 802.11 standarda [11]

Standard	Opis	Status
IEEE 802.11	WLAN do 2 Mb/s, 2,4 GHz	Odobren 1997.
IEEE 802.11a	WLAN do 54 Mb/s, 5 GHz	Odobren 1999.
IEEE 802.11b	WLAN do 11 Mb/s, 2,4 GHz	Odobren 1999.
IEEE 802.11g	WLAN do 54 Mb/s, 2,4 GHz	Odobren 2003.
IEEE 802.11e	Nove koordinacijske funkcije za QoS	U razvoju radne grupe

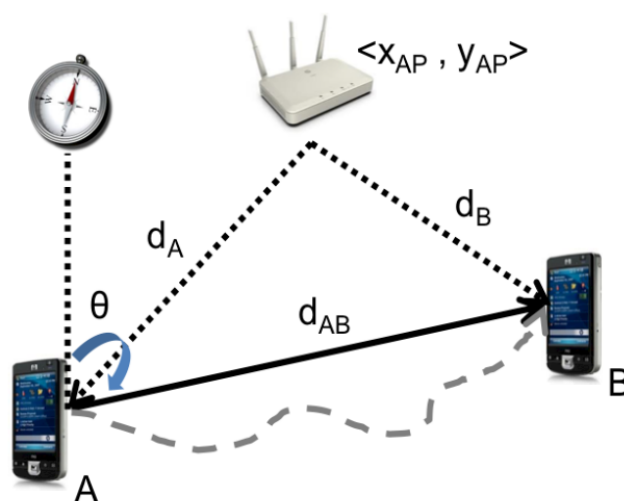
IEEE 802.11f	IAPP (Inter-AP protokol)	Odobren 2003.
IEEE 802.11h	5 GHz frekvencijski pojas u Europi	Odobren 2003.
IEEE 802.11i	Novi standardi enkripcije	Odobren 2004.
IEEE 802.11n	MIMO fizički sloj	U razvoju radne grupe

Iako mu to nije primarna namjena, osim za mrežnu povezanost mobilnih uređaja, WiFi signal može se koristiti i za lokalizaciju. Pomoću novijih metoda baziranih na triangulaciji i multilateraciji, primjena WiFi-ja za lokalizaciju u zatvorenim prostorima je postala zanimljivim predmetom istraživanja, baš zbog sveprisutnosti WiFi-ja.

Glavne metode pomoću kojih se dobiva udaljenost u sustavima baziranim na WiFi-ju su RSSI (*engl. Received Signal Strength Indicator*) i ToF (*engl. Time of Flight*). RSSI je metoda u kojoj se pomoću izmjerene jačine signala na lokatoru, koji je u ovom slučaju WiFi AP (*engl. Access Point*) stalne pozicije, može izračunati udaljenost uređaja od lokatora, na način da se odredi izgubljena snaga tijekom prijenosa signala. ToF je definiran kao ukupno vrijeme potrebno da signal propagira od AP do mobilnog uređaja i nazad. Zatim se udaljenost može izračunati jednostavnom formulom za prijeđeni put.

$$s = c * ToF \quad (2.1.)$$

Bitno je da ToF bude precizno izmjeren jer je brzina propagacije WiFi signala jednaka brzini svjetlosti. Udaljenost uređaja od stacionarnog lokatora (AP) računa se u svakom koraku. Trenutna udaljenost od AP uspoređuje se s udaljenosti od AP u prethodnom koraku te udaljenosti od prethodne pozicije (slika 8.). Kako bi se dobila udaljenost od prethodne do trenutne pozicije, koristi se DR algoritam (*engl. Dead Reckoning*).



Slika 8. Trokut formiran pomoću dobivenih udaljenosti [12]

Rezultati lokalizacije pomoću WiFi-ja ovom metodom precizni su do 0,8 m, ali podložni su interferencijama kao što su refleksija signala (*engl. Multipath Propagation*) zbog računanja udaljenosti pomoću ToF ili RSSI. Računanje udaljenosti prethodne i trenutne pozicije korištenjem DR algoritma zahtijeva i dodatan IMU senzor na uređaju (*engl. Inertial Measurement Unit*), koji nije uvijek dostupan i dodatno povisuje cijenu primjene.

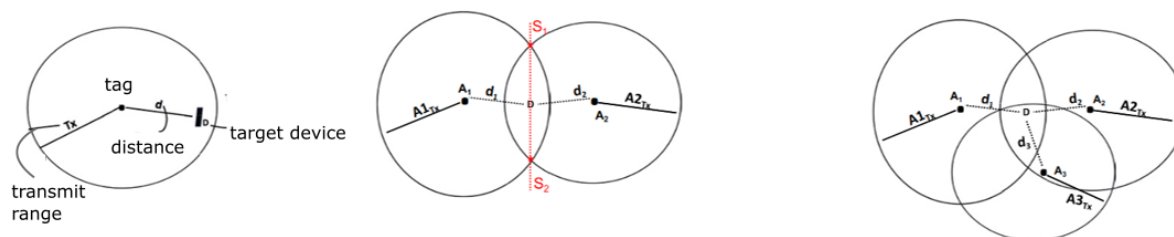
### 2.3. Identifikacija pomoću radio frekvencije - RFID

RFID (*engl. Radio Frequency Identification*) jeftina je tehnologija koja omogućava identifikaciju na daljinu, neovisno o LoS, s mogućnošću pohrane više jedinstvenih identifikatora nego barkod. RFID odašiljači (*engl. asset, tag*) se dijele na aktivne, koji zahtijevaju izvor struje, i pasivne, kojima je životni vijek određen na temelju pohranjene energije koja se gubi svakim očitanjem. Aktivni RFID odašiljači znatno su skuplji od pasivnih, koji su u svojoj osnovi sačinjeni od svega tri dijela: antene, poluvodičkog čipa i enkapsulacije zbog zaštite od raznih uvjeta. Prema radnoj frekvenciji, RFID odašiljači dijele se na RFID bliskog polja (*engl. near-field*) i RFID dalekog polja (*engl. far-field*). Radna frekvencija RFID dalekog polja veća je od 100 MHz i obično iznosi 2,45 GHz (u UHF pojasu), dok je radna frekvencija RFID bliskog polja manja od 100 MHz.



**Slika 9. Jednostavna struktura i razne veličine pasivnih RFID odašiljača [13]**

Pasivni RFID odašiljači (slika 9.) zbog svoje jednostavnosti i niske cijene koriste se u sustavima koji zahtijevaju velik broj odašiljača, kao što su automatizirana pametna parkirališta [14]. Međutim, RFID tehnologija ima vrlo limitiranu mogućnost precizne lokalizacije, te su takvi sustavi tek u ranom razvoju. Jedan takav sustav (slika 10.) koristi određen broj RFID odašiljača rasprostranjenih po području, te se služi algoritmom koji pomoću refleksije signala tih odašiljača računa poziciju mobilnog uređaja. Uz to, razvijen je i algoritam koji optimalno raspoređuje te odašiljače po području.



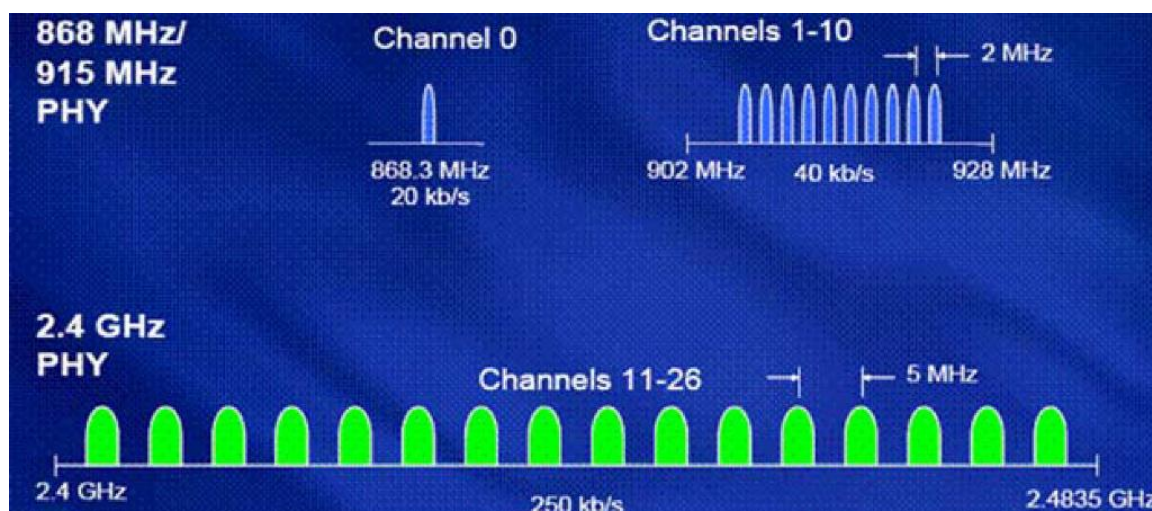
Slika 10. Sustav za lokalizaciju pomoću mreže RFID odašiljača [15]

Ovakav sustav je jednostavan i jeftin, no može samo aproksimirati poziciju uređaja, te značajno ovisi o broju, rasporedu i jačini RFID odašiljača. RFID tehnologija ipak primarno služi za identifikaciju uređaja, a tek u specifičnim slučajevima može biti sredstvo za lokalizaciju mobilnih uređaja.

#### 2.4. ZigBee protokol i dugodometna bežična tehnologija - LoRa

I ZigBee i LoRa (*engl. Long Range*) su bežične tehnologije koje se koriste za IoT primjene. Dok se ZigBee najčešće koristi za uspostavljanje mreža bežičnih senzora (*engl. WSN – Wireless Sensor Networks*) dometa do oko 100 m, LoRa se koristi za nadzor nekih osnovnih primjena, kao što su pametna rasvjeta u gradovima ili detekcija požara, do udaljenosti i preko 10 km. Obje tehnologije imaju nisku brzinu prijenosa podataka, ZigBee do 250 kbps, a LoRa do svega 50 kbps, ali uz minimalnu potrošnju energije.

ZigBee tehnologija temeljena je na IEEE 802.15.4. standardu, a njen glavni cilj je omogućiti komunikaciju između senzora s minimalnim kašnjenjem i smanjenom potrošnjom energije. Njegove radne frekvencije su 868 MHz u Europi, 902 do 928 MHz u Sjevernoj Americi i 2,4 GHz za svjetske primjene (slika 11.).



Slika 11. Raspored komunikacijskih kanala ZigBee tehnologije [16]

Primjena ZigBee za lokalizaciju služi se RSSI. U istraživanju Goncalo, G. i sur. [17], željena pozicija se računa pomoću triangulacije udaljenosti dobivenih pomoću RSSI. Takav pristup dao je pogrešku do 2 m, budući da se radi o unutrašnjem prostoru s puno objekata koje uzrokuju *multipath* efekt. Druga primjena ZigBee tehnologije bliska je traženoj primjeni u ovom radu. U istraživanju Krmpetić, R. i sur. [18], ZigBee je korišten u svrhu detekcije zauzetog veza u marinama služeći se aktivnim RFID odašiljačima koji komuniciraju pomoću ZigBee standarda. S druge strane, u toj primjeni nije bilo potrebe za lokalizacijom brodova, nego je cilj bio ostvariti što dulji životni vijek baterije minimizacijom potrošnje energije. Općenito, ZigBee je najbolja opcija umrežavanja senzora ako je potrebno jeftino, jednostavno i kompaktno rješenje s niskim kašnjenjem, niskom potrošnjom energije i mogućnosti interoperabilnosti.

Kao relativno nova tehnologija iz 2014., LoRa ima manju energetska potrošnju od ZigBee tehnologije, ali zbog velikog dometa podložna je kašnjenju podataka. Služi se duplom AES enkripcijom podataka, što ju čini puno sigurnijom od WiFi-ja, a imuna je na iščezavanje signala (*engl. Multipath fading*) jer koristi modulaciju signala pomoću CSS (*engl. Chirp Spread Spectrum*) [19]. U CSS, željeni podaci se moduliraju sa *chirp* signalom, kojem se frekvencija snižava ili povećava tijekom vremena. Nakon modulacije, signal sadrži nagle frekvencijske skokove koje predstavljaju kriptirane podatke koji se žele prenijeti. Pri dolasku na prijamnik, signal je demoduliran i dekriptiran u svoju originalnu poruku. LoRa je robusna i sigurna dugodometna bežična tehnologija, ali glavna joj je mana niska brzina prijenosa podataka i kašnjenje te se ne može efikasno koristiti u svrhe lokalizacije u stvarnom vremenu (*engl. real-time*).

## 2.5. Bluetooth niske energije - BLE

BLE (*engl. Bluetooth Low Energy*) posebna je vrsta Bluetooth tehnologije koju je Bluetooth SIG (*engl. Bluetooth Special Interest Group*) osmislio i objavio 2010. godine u sklopu Bluetooth 4.0 Cilj BLE je rješavanje dosadašnjih problema na koje je običan Bluetooth (Bluetooth BR/EDR) nailazio prilikom WSN primjena, te povećane performanse u odnosu na ostale WSN tehnologije. Radna frekvencija BLE je u 2,4 GHz ISM pojasu, i sastoji se od ukupno 40 kanala međusobno udaljenih 2 MHz, od kojih je 37 namijenjeno za komunikaciju, a tri namijenjeno za oglašavanje (*engl. advertising*) [20].

Od 5.0 specifikacije, Bluetooth LE dobiva mogućnost korištenja različitih konfiguracija fizičkih slojeva (PHY – *engl. Physical Layer*) s obzirom za koju primjenu se koristi. PHY konfiguracije određuju brzinu prijenosa podataka i domet BLE tehnologije (tablica 2.).

**Tablica 2. Različiti PHY slojevi BLE 5.0+ tehnologije [21]**

PHY	Modulation scheme	Coding scheme		Data rate
		Access Header	Payload	
LE 1M	1 Msym/s modulation	Uncoded	Uncoded	1 Mb/s
LE 2M	2 Msym/s modulation	Uncoded	Uncoded	2 Mb/s
LE Coded	1 Msym/s modulation	S=8	S=8	125 kb/s
			S=2	500 kb/s

Od 5.0 specifikacije BLE se počinje služiti RSSI za estimaciju udaljenosti te se počeo primjenjivati u svrhu lokalizacije u zatvorenim prostorima. Korištenjem RSSI u kombinaciji s raznim metodama filtriranja podataka ili čak metodama strojnog učenja [22], BLE je u mogućnosti postići prosječnu pogrešku pozicioniranja oko 1 m.

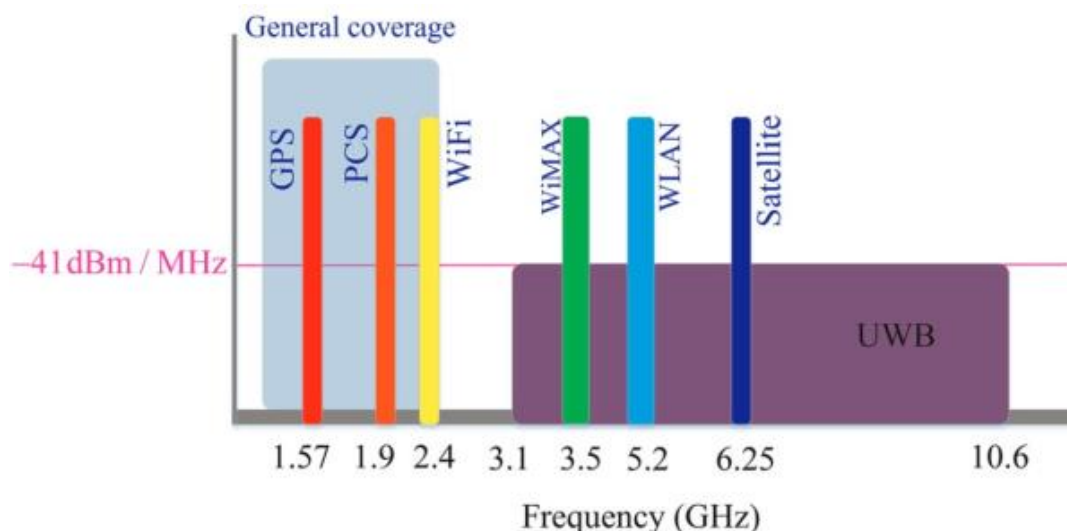
Bluetooth Core specifikacija 5.1 [23] revolucionizira korištenje kratkometnih bežičnih tehnologija u svrhu lokalizacije uvođenjem tehnologije određivanja smjera signala (DF – *engl. Direction Finding*) pomoću BLE. BLE DF pomoću dvije različite metode može precizno odrediti kut odašiljanja Bluetooth signala.

Glavne prednosti BLE, uz spomenuti DF, su niska potrošnja energije, dobra brzina prijenosa podataka, relativno jednostavan softverski stog (*engl. Stack*), niska cijena i jednostavna implementacija uz dobru korisničku podršku proizvođača.

## 2.6. Ultra-širokopojasna bežična tehnologija - UWB

UWB (*engl. Ultra Wideband*) je kratkometna bežična tehnologija razvijena za prijenos podataka velikim brzinama pri niskim gustoćama snage. UWB je predstavljen i uveden 2007. godine IEEE 802.15.4a standardom i od tada je područje interesa brojnih znanstvenih radova zbog svoje široke mogućnosti primjene [24]. Po definiciji federalne komunikacijske komisije, UWB uređaj je svaki uređaj čiji je raspon radnih frekvencija veći od 20% centralne frekvencije, te da je ujedno veći od barem 500 MHz. Ovako širok raspon radnih frekvencija čini UWB tehnologiju jedinstvenom naspram drugih spomenutih tehnologija (slika 12.).





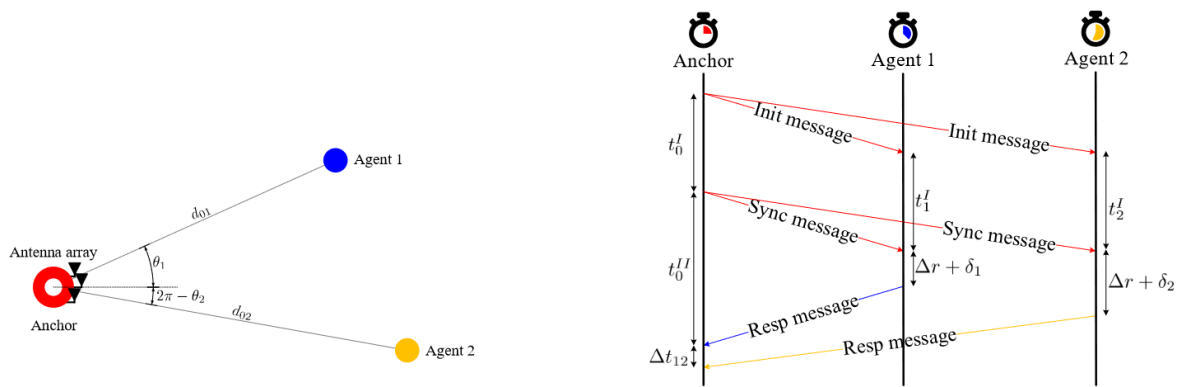
Slika 12. Usporedba raspona radnih frekvencija [25]

UWB funkcioniра oдаšiljanjem kratkih pulseva, koji mogu biti jednopoјasni ili višepoјasni. Impulsna tehnologija obično se koristi u radarskim primjenama (RADAR – *engl. Radio Detection and Ranging*), zbog visoke prostorne rezolucije, svojstva visoke penetracije materijala, lakog otkrivanja cilja i niske mogućnosti presretanja signala. Zbog svoje pouzdanosti, UWB radar ima svoje primjene kod lokalizacije i komunikacije u vojne svrhe [26]. U komercijalne svrhe, UWB je sve češći u primjenama za kratkometnu lokalizaciju ili komunikaciju, kao što je Apple-ov AirTag za traženje izgubljenih stvari (npr. ključevi i sl.) ili AirDrop za slanje slika ili dokumenata obližnjim Apple uređajima (slika 13.).



Slika 13. Apple AirDrop i AirTag [27]

UWB je glavno područje istraživanja kod primjena za lokalizaciju i praćenje u zatvorenim prostorima. Većina UWB lokalizacijskih sustava koristi metodu trilateracije, što zahtijeva korištenje više lokatora te su takvi sustavi skupi. Kako je pokazano u istraživanju Wang, T. i sur. [28], lokalizacija se vrši pomoću UWB tehnologije te samo jednog lokatora, kombinirajući metodu ToF za dobivanje udaljenosti i DF metode koje koristi spomenuti BLE 5.1+.



Slika 14. AoA + ToF [28]

Rezultati su pokazali da je uz UWB moguće postići visoku preciznost lokalizacije ( $< 20$  cm) koristeći samo jedan lokator.

## 2.7. Usporedba bežičnih tehnologija

Prethodno navedene bežične tehnologije imaju svoje prednosti i mane za upotrebu u svrhu lokalizacije. Za primjenu lokalizacije i identifikacije brodova zadanu u ovom radu najbitnije stavke su sljedeće:

- Dovoljno dobra preciznost lokalizacije kako bi sustav mogao međusobno razlikovati brodove
- Dovoljno velik domet signala (barem 10 m)
- Niska cijena odašiljača, jer će sveukupno biti potrebno oko 1000 odašiljača (po jedan za svaki brod)
- Minimalna potrošnja energije, kako bi se osigurao dug vijek baterije
- Jednostavnost implementacije
- Mogućnost kupnje komercijalnih odašiljača
- Robusnost tehnologije na interferenciju signala u vanjskom okruženju marine

Usporedba značajki različitih bežičnih tehnologija dana je u tablici 3.

Tablica 3. Usporedba bežičnih tehnologija [6]

Kriterij	Tehnologija					
	RFID		BLE	UWB	WiFi	LoRa
	Pasivni	Aktivni				
<b>Pružatelji usluge</b>	Zebra, Alien, Impinj	Zebra, Alien, Airfinder	Quuppa, Nordic, SiliconLabs, FeasyBeacon	Pozyx, Kinexon, Decawave	Aruba, AeroScout, Redpine Signal	Lora Alliance, Semtech
<b>Primjena</b>	Identifikacija	Identifikacija	Identifikacija + Lokalizacija	Identifikacija + Lokalizacija	Identifikacija + WPS + GPS	Identifikacija + WPS
<b>Prikladno za</b>	Detekciju u točki	Detekciju u točki	Detekciju na području	Detekciju na području	Detekciju na području	Detekciju na području
<b>Domet</b>	< 1 m	< 1 m	5 – 50 m	20 – 100 m	< 150 m	> 10000 m
<b>Preciznost</b>	< 10 cm	< 10 cm	2 – 3 m, < 8 m	< 30 cm	< 15 m	> 500 m
<b>Baterija</b>	-	3 – 5 god.	2 – 5 god.	< 2 god.	< 3 god.	< 3 god.
<b>Kompatibilnost sa mobitelom</b>	Ne	Ne	Da	Da	Da	da
<b>Implementacija (zadani slučaj)</b>	Komplicirana	Komplicirana	jednostavna (hardverski i softverski)	jednostavna (hardverski)	komplicirana zbog kalibracije	komplicirana zbog kalibracije
<b>Cijena</b>	50 centi	\$ 20 – 100	\$ 5 – 100	\$ 100 +	\$ 100 +	-
<b>Potrošnja energije</b>	Niska	Visoka	niska	Niska	Niska	niska

Može se zaključiti da WiFi tehnologija zbog svoje niske razine sigurnosti, visoke cijene te komplicirane implementacije nije prikladna za zadanu primjenu. LoRa tehnologija, kako je objašnjeno u poglavlju 2.4., u svojoj suštini nije zamišljena za lokalizaciju u stvarnom vremenu zbog kašnjenja. Također, LoRa sama po sebi nije zamišljena za lokalizaciju već za prijenos podataka pa bi se ta implementacija morala kombinirati sa GPS sensorima. Precizni GPS senzori s dugim vijekom trajanja baterije vrlo su skupi, a potreban bi bio po jedan takav senzor na svakom brodu, što je ekonomski neprihvatljivo.

ZigBee, koji je protokol temeljen na RFID tehnologiji, jeftino je rješenje. Problem kod RFID tehnologije je taj što nudi samo identifikaciju i detekciju, a ne i lokalizaciju brodova. Iz tog razloga, ovakva implementacija zahtijevala bi RFID prijatelj na svakom vezu u marini, slično

kao i u istraživanju Krmpetić, R. i sur. [18]. Za lokalizaciju brodova, trebao bi se implementirati sustav sličan onom predstavljenom u istraživanju Diallo, A. i sur. [15], što je vrlo komplicirano zbog same strukture marine (slika 15.).



**Slika 15. Ortofoto marine Punat**

Naposlijetku, implementacija traženog sustava svodi se na odabir UWB ili BLE tehnologije, uz ideju da se jedan mobilni prijamnik nalazi na robotu, a odašiljači koji odašilju signal na brodovima. Kako robot patrolira marinom, tako prolazi pored privezanih brodova i dobiva signal s njihovih odašiljača, pomoću kojeg će identificirati brodove i aproksimirati njihovu poziciju.

UWB tehnologija vrši precizniju lokalizaciju nego BLE tehnologija, kombinirajući DF s ToF. Istraživanje Wang, T. i sur. [28] pokazuje da je preciznost UWB koristeći jedan prijamnik i više nego dostatna za zadanu primjenu. S druge strane, BLE primjena s jednim prijammnikom koja kombinira DF s RSSI i PR (*engl. Pedestrian Reckoning*) pomoću IMU senzora, u mogućnosti je postići preciznost lokalizacije unutar 2 m [29], što je dovoljno precizno za razlikovanje brodova u marini koji su u stvarnosti udaljeniji od 2 m. Isto tako, po tablici 3., i BLE i UWB tehnologija imaju domet veći od traženih 10 m. U slučajevima bez direktne vidljivosti i s jakom interferencijom signala, u Bolter, L. i sur. [30] UWB se pokazao kao znatno robusnija tehnologija od BLE. Međutim, kod povećanja broja antena na prijammniku, poboljšava se i preciznost DF, pa je tako moguće povećati preciznost BLE u nepovoljnim uvjetima prijenosa signala.

Presudni faktori kod odabira tehnologije su zatim cijena, životni vijek baterije i jednostavnost implementacije. Prosječna potrošnja energije BLE konekcije, koristeći interval od 7,5 ms je oko 10 mW [31], dok je prosječna potrošnja UWB oko 280,5 mW [30], stoga će baterija BLE odašiljača trajati znatno dulje od UWB. BLE također ima puno više ponuđenih komercijalnih rješenja od UWB te ga je zbog tog lakše implementirati jer nije potrebno pisanje vlastitog koda od početka. Na tržištu su dostupni cijeli DF BLE kompleti kao što je U-Blox XPLR-AOA-1 [32]. Oni sadrže prijamnik i odašiljač, zajedno s programskim kodom kojeg je moguće prilagoditi za vlastiti slučaj primjene. Međutim, presudni faktor kod odabira tehnologije bila je cijena. Dok se cijena BLE kompleta kreće u rangu 150 € do 600 €, te su dostupni razni proizvođači na tržištu, UWB kompleti dosežu i do 2000 € [33]. Uz to, većina UWB rješenja nije odmah upotrebljiva, nego je potrebno znatno više programiranja i konfiguriranja nego kod BLE.

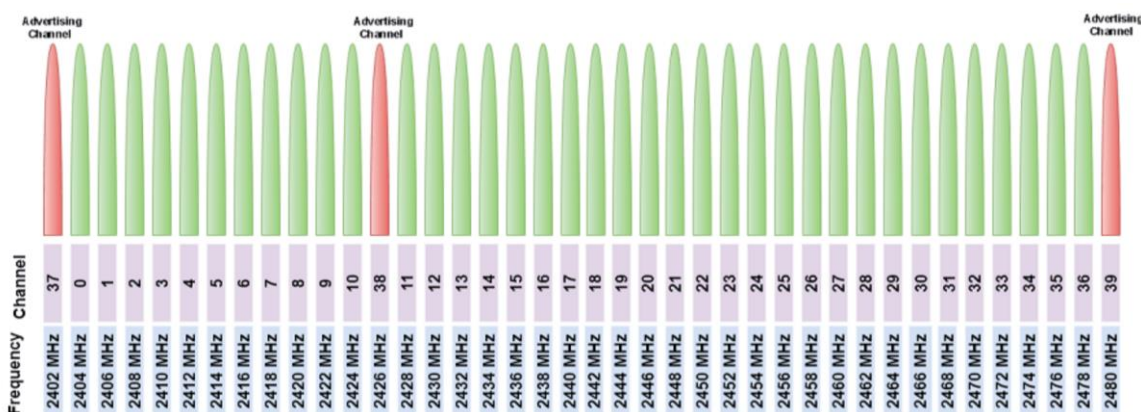
BLE nudi i veliki izbor komercijalnih odašiljača koji su znatno jeftiniji u usporedbi s UWB. Cijena komercijalnih UWB odašiljača kreće od 50 € nadalje [34], dok komercijalni BLE odašiljači kao što je FeasyBeacon (slika 16.), koštaju svega desetak eura.



**Slika 16. FSC-BP104 BLE 5.1 odašiljač [35]**

### 3. BLUETOOTH NISKE ENERGIJE - TEHNOLOGIJA

BLE tehnologija ukratko je već opisana u poglavlju 2.5., no ovdje će se detaljnije opisati izgled BLE paketa, dati kompletna struktura BLE stoga i objasniti razni načini rada BLE tehnologije. Radna frekvencija BLE tehnologije nalazi se u ISM pojasu, između 2,402 GHz i 2,48 GHz, te obuhvaća 40 kanala širine 2 MHz. Od Bluetooth specifikacije 5.0, tri kanala: 37, 38 i 39 služe isključivo za (jednosmjerno) slanje primarnih oglasnih paketa (*engl. legacy advertising*), dok ostali kanali služe za dvosmjerni prijenos podataka ili za slanje sekundarnih oglasnih paketa (*engl. extended advertising*) (slika 17.).



Slika 17. Radna frekvencija BLE [36]

Oglasni paketi (*engl. advertising packets*) služe za pronalaženje drugih Bluetooth uređaja, uspostavljanje veze između uređaja ili emitiranje. Njihova frekvencija je odabrana kako bi se minimizirala interferencija između IEEE 802.11 kanala 1, 6 i 11, koji su često korišteni u mnogim državama. Kanali za prijenos podataka služe se AFH (*engl. Adaptive Frequency Hopping*) za odabir točnog kanala komunikacije u vremenskom intervalu. AFH je robusna metoda za prilagođavanje smetnjama signala.

Modulacija Bluetooth signala odnosi se na proces variranja visokofrekventnog nosećeg signala (*engl. carrier signal*) s niskofrekventnim podatkovnim signalom (*engl. data signal*). Modulacija signala potrebna je iz više razloga [37]:

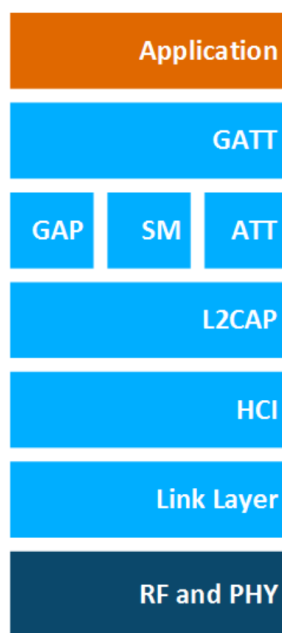
- Podatkovni signal niske je frekvencije, što znači da nam je za njega potrebna znatno veća antena nego za signal visoke frekvencije
- Niskofrekventni signali nalaze se u širem frekvencijskom području, što ih čini osjetljivijima na šum

- Snaga antene obrnuto je proporcionalna valnoj duljini signala i proporcionalna duljini antene, što znači da će za jednako veliku antenu visokofrekventni signali biti jači od niskofrekventnih

Svi kanali za prijenos podataka služe se GFSK (*engl. Gaussian Frequency Shift Keying*) modulacijom. GFSK modulacija je vrsta frekvencijske modulacije koja koristi Gaussov filter kako bi se smanjila visokofrekvencijska komponenta u (digitalnom) podatkovnom signalu. Zatim se pomoću tog filtriranog signala vrši modulacija nosećeg signala.

### 3.1. Stog Bluetooth-a niske energije

Softverski stog *Bluetooth Low Energy* tehnologije smisleno je podijeljen na manje cjeline (slika 18.). Sastoji se od fizičkog sloja, sloja veze (LL – *engl. link layer*), sučelja poslužitelj-upravljač (HCI – *engl. Host-Controller Interface*), sloja logičkog upravljanja veze (L2CAP – *engl. Logical Link Control and Adaptation Protocol*), protokola atributa (ATT – *engl. Attribute Protocol*), sigurnosnog menadžera (SM – *engl. Security Manager*), generičnog pristupnog profila (GAP – *engl. Generic Access Profile*), generičnog atributnog profila (GATT – *engl. Generic Attribute Profile*), te sloja primjene.



Slika 18. Prikaz BLE stoga [38]

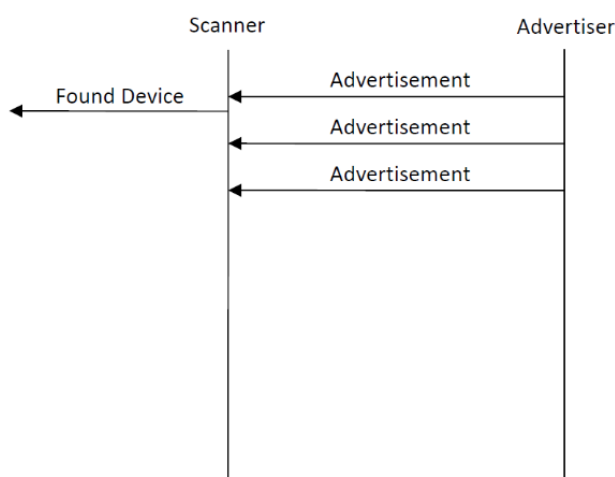
Fizički sloj (PHY) najniži je sloj BLE stoga i zaslužan je za odašiljanje i primanje signala. Kao takav, najbliži je hardveru te direktno vrši modulaciju signala. Razni modovi fizičkog sloja opisani su u poglavlju 2.5. (tablica 2.).

Sloj veze (LL) definira strukturu paketa, upravlja radiom (fizičkim slojem), sadrži stroj stanja (*engl. state machine*) i vrši enkripciju na razini LL. LL također vrši slanje paketa za oglašavanje,

skenera nadolazeće pakete i uspostavlja vezu između uređaja. Oglašavanje je jedna od najbitnijih stavki BLE tehnologije. Ono daje način uređajima da oglase svoju prisutnost, dozvoljava uspostavu veze između uređaja i omogućava opcionalno slanje osnovnih podataka, kao što je ime uređaja ili razina snage transmisije. Glavni parametri oglašavanja koji se mogu mijenjati ovisno o primjeni su:

- Interval oglašavanja (*engl. advertisement interval*) – može biti od 20 ms do 10240 ms
- Kanali oglašavanja (*engl. advertisement channels*) – standardno 37, 38 i 39 (primarni kanali), 0-10 i 11-36 (BT 5+ sekundarni kanali)
- Način otkrivanja (*engl. discoverability mode*) – nevidljiv (*engl. not discoverable*), ograničeno vidljiv (*engl. limited discoverable*), općenito vidljiv (*engl. generic discoverable*), emitiranje (*engl. broadcast*)
- Način veze (*engl. connectability mode*) – nepoveziv (*engl. not connectable*), usmjereno poveziv (*engl. directed connectable*), neusmjereno poveziv (*engl. undirected connectable*)
- Podaci (*engl. payload*) – 0 do 31 B (primarno oglašavanje), 0 do 255 B (BT 5+ sekundarno oglašavanje)

Kod skeniranja, uređaj osluškuje (*engl. listens*) nadolazeće oglasne pakete kako bi otkrio uređaje, povezao se s njima ili samo primio emitirane podatke. Skeniranje LL može biti pasivno ili aktivno. U pasivnom skeniranju, uređaj jednostavno osluškuje nadolazeće oglasne pakete, na način da ciklično prolazi kroz kanale oglašavanja (slika 19.).

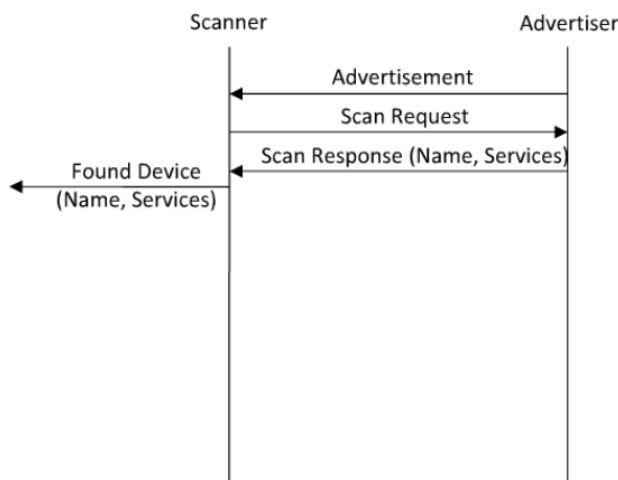


**Slika 19. Pasivno skeniranje [38]**

U aktivnom skeniranju, uređaj također osluškuje nadolazeće oglasne pakete, ali pri primanju šalje dodatni zahtjev oglašivaču (*engl. advertiser*) u svrhu dobivanja dodatnih informacija (slika



20.). Na taj zahtjev, oglašivač šalje odgovor koji obično sadrži listu podržanih uređaja i ime oglašivača, no željene podatke u odgovoru moguće je promijeniti ovisno o primjeni.



**Slika 20. Aktivno skeniranje [38]**

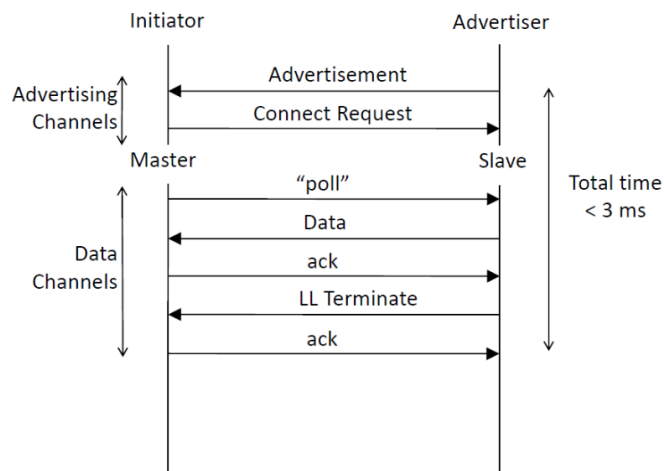
Glavni parametri skeniranja koji se mogu mijenjati ovisno o primjeni su:

- Interval skeniranja (*engl. scan interval*) – može biti od 2,5 ms do 10240 ms
- Okvir skeniranja (*engl. scan window*) – može biti od 2,5 ms do 10240 ms
- Tip skeniranja (*engl. scan type*) – limitiran (*engl. limited*), običan (*engl. generic*), promatranje (*engl. observation*)
- Način skeniranja (*engl. scan mode*) – aktivan (*engl. active*), pasivan (*engl. passive*)
- Način veze (*engl. connectability mode*) – nepoveziv (*engl. not connectable*), usmjereno poveziv (*engl. directed connectable*), neusmjereno poveziv (*engl. undirected connectable*)

BT 5.0 tehnologija uvodi mehanizme primarnog (*legacy*), sekundarnog (*extended*) i periodičkog (*engl. periodic advertising*) oglašavanja. Primarno oglašavanje koristi isključivo kanale za oglašavanje (37, 38, 39) dok sekundarno koristi i kanale za prijenos podataka (0 do 36) što omogućava veći prijenos podataka. Sekundarno oglašavanje se koristi i kako bi se započelo periodičko oglašavanje, koje oglasne pakete šalje u fiksnom vremenskom intervalu. Uređaj koji osluškuje dolazne pakete kod periodičkog oglašavanja u mogućnosti je sinkronizirati se s uređajem koji ih odašilje.

Veze između BLE uređaja omogućuju pouzdan i robusan prijenos podataka, zbog mehanizama kao što su AFH, provjere oštećenih podataka pomoću cikličke provjere redundancije (CRC – *engl. Cyclic Redundancy Check*) te ponovnog odašiljanja izgubljenih podataka. BLE veza

uvijek započinje kada uređaj koji skenira zaprimi oglašavajući paket koji sadrži informaciju da oglašivač dopušta vezu (slika 21.).



Slika 21. Uspostava BLE veze [38]

Glavni parametri veze koji se mogu mijenjati ovisno o primjeni su:

- Minimalan interval veze (*engl. minimum connection interval*) – standardno 7,5 ms
- Maksimalan interval veze (*engl. maximum connection interval*) – standardno 4000 ms
- Kašnjenje veze (*engl. connection latency*) – od 0 do 500 trajanja intervala veze
- Vremensko ograničenje (*engl. supervision timeout*) do prekida veze – od 100 ms do 32000 ms

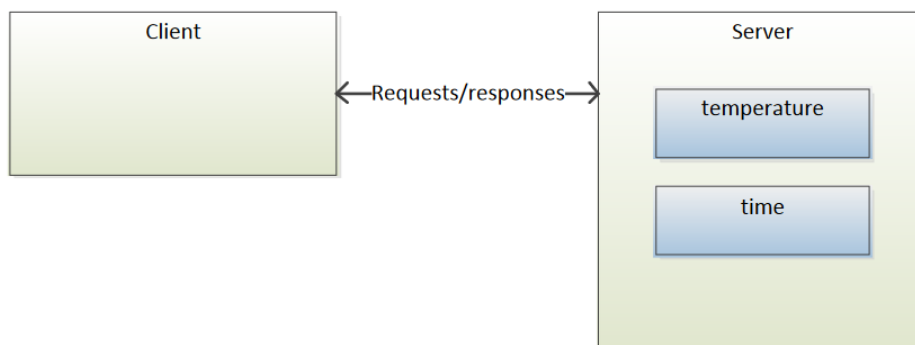
PHY i LL zajedno se nazivaju upravljač (*engl. Controller*), dok se ostali, viši slojevi, zajedno nazivaju poslužitelj (*engl. Host*). Oni zajedno komuniciraju putem HCI.

Od viših slojeva prvi je L2CAP sloj, koji se ponaša kao multiplekser protokola, upravljajući segmentacijom i sastavljanjem paketa. Pruža logičke kanale koji se multipleksiraju preko jedne ili više logičkih veza. L2CAP BLE tehnologije je optimizirana i pojednostavljena verzija običnog BT L2CAP sloja.

Protokol atributa (ATT) nudi različite načine za prijenos podataka između BLE uređaja. Pruža metode za čitanje i pisanje vrijednosti atributa te metode za indikacije i obavještanje o vrijednostima raznih atributa. ATT se koristi u većini BLE primjena. ATT definira dvije uloge (slika 22.):

- Poslužitelj (*engl. server*) – uređaj koji pohranjuje podatke kao jedan ili više atributa
- Klijent (*engl. client*) – uređaj koji prikuplja informacije za jednog ili više poslužitelja

Klijent može pristupiti atributima slanjem zahtjeva poslužitelju, ali isto tako može upisati nove vrijednosti atributa. Na zahtjeve klijenta poslužitelj je uvijek dužan vratiti odgovor.



Slika 22. Uloge uređaja [38]

Osim vrijednosti, koja varira od 0 do 512 B, atributi uvijek sadrže univerzalni jedinstveni identifikator (UUID – *engl. Universally Unique Identifier*) i adresu pristupa (*engl. Handle*) (tablica 4.).

Tablica 4. Primjer atributa [38]

Adresa pristupa	UUID	Vrijednost	Opis
0x0001	0x1804	0x0000	TX snaga u dBm
T0x0002	0x2a00	0x426c75656769676120546563686e6f6c6f6769657	Ime uređaja, UTF-8

Atributi također sadrže odobrenja (*engl. permissions*) i s obzirom na to mogu biti:

- Čitljivi (*engl. readable*) ili nečitljivi (*engl. not readable*)
- Za pisanje (*engl. writable*) ili nisu za pisanje (*engl. not writable*)
- Za pisanje i za čitanje (*engl. readable and writable*) ili nisu ni za pisanje ni za čitanje (*engl. not readable and not writable*)

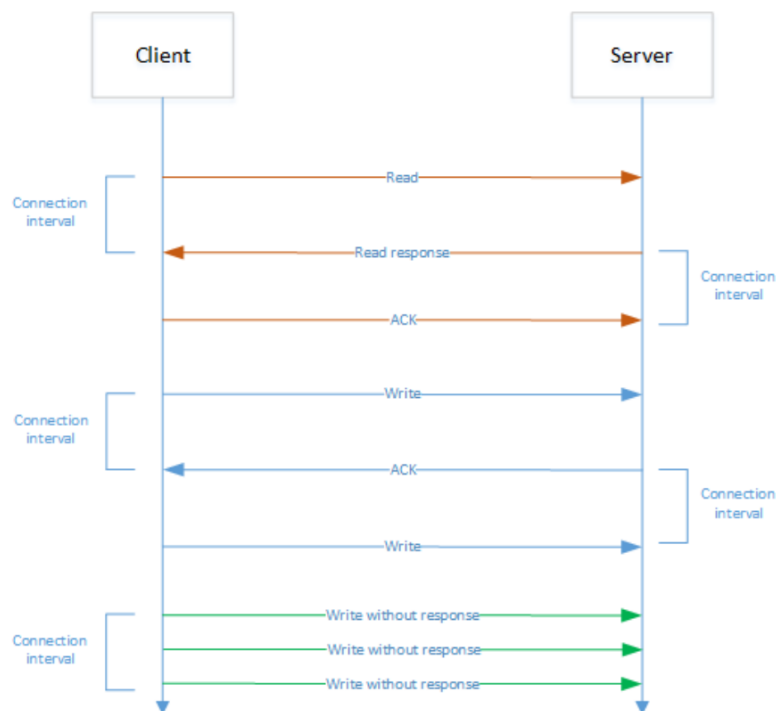
Neki atributi također mogu zatražiti provjeru autentičnosti ili autorizaciju za pristup ili mijenjanje njihovih vrijednosti.

ATT protokol je sekvencijalni protokol bez stanja, što znači da se istovremeno može izvršavati samo jedna naredba i nijedno stanje nije pohranjeno u protokolu. U tablici 5. prikazane su dostupne metode ATT protokola.

Tablica 5. Metode ATT protokola [38]

Metoda	Opis	Smjer
Pronađi informacije ( <i>engl. find information</i> )	Pronalazi adrese atributa i njihove UUID-je	klijent -> poslužitelj
Pronađi prema vrsti vrijednosti ( <i>engl. find by type value</i> )	Vraća adrese svih atributa koji odgovaraju vrsti i vrijednosti	klijent -> poslužitelj
Pročitaj prema vrsti grupe ( <i>engl. read by group type</i> )	Čita vrijednost svakog atributa zadane vrste u zadanom rasponu	klijent -> poslužitelj
Pročitaj prema vrsti ( <i>engl. read by type</i> )	Čita vrijednost svakog atributa zadane vrste u zadanom rasponu	klijent -> poslužitelj
Pročitaj ( <i>engl. read</i> )	Čita vrijednost na zadanoj adresi, veličine do 250 B	klijent -> poslužitelj
Pročitaj sve ( <i>engl. read blob</i> )	Čita vrijednost atributa većih od 250 B, do veličine 64 kB	klijent -> poslužitelj
Pročitaj nekoliko ( <i>engl. read multiple</i> )	Čita više vrijednosti odjednom	klijent -> poslužitelj
Upiši ( <i>engl. write</i> )	Piše vrijednost na zadanu adresu, bez odgovora	klijent -> poslužitelj
Pripremi upis i izvrši ( <i>engl. prepare write and execute</i> )	Priprema upis vrijednosti, koji čeka u poslužitelju do izvršenja	klijent -> poslužitelj
Obradi vrijednost obavijesti ( <i>engl. handle value notification</i> )	Poslužitelj obavještava klijenta da je atribut poprimio novu vrijednost	poslužitelj -> klijent
Obradi vrijednost indikacije ( <i>engl. handle value indication</i> )	Poslužitelj ukazuje klijentu da je atribut poprimio novu vrijednost. Klijent mora potvrditi primitak poruke.	poslužitelj -> klijent
Odgovor na pogrešku ( <i>engl. error response</i> )	Bilokoji zahtjev može uzrokovati pogrešku. U tom slučaju odgovor na pogrešku daje informacije o pogrešci.	poslužitelj -> klijent

ATT naredbe također mogu zahtijevati priznanja (ACKs – *engl. acknowledgements*). Priznanja javljaju koji podatkovni paketi su uspješno poslani. Kod takvih naredbi, poslužitelj treba pričekati ACK klijenta (slika 23.) pa se zato koriste za primjene gdje je potreban izuzetno pouzdan prijenos podataka, uz cijenu smanjenog protoka podataka.



**Slika 23. Prijenos podataka sa i bez ACK [38]**

Generični atributni profil (GATT) služi za grupiranje pojedinačnih atributa u veće servise, kao što je npr. servis mjerenja pulsa, koji opisuje rad senzora za mjerenje pulsa. Uz dobivene podatke, GATT također nudi pristup pojedinačnim atributima te informacije o njihovim razinama sigurnosti. GATT se nalazi sloj iznad ATT protokola, i također definira dvije uloge uređaja: poslužitelj i klijent.

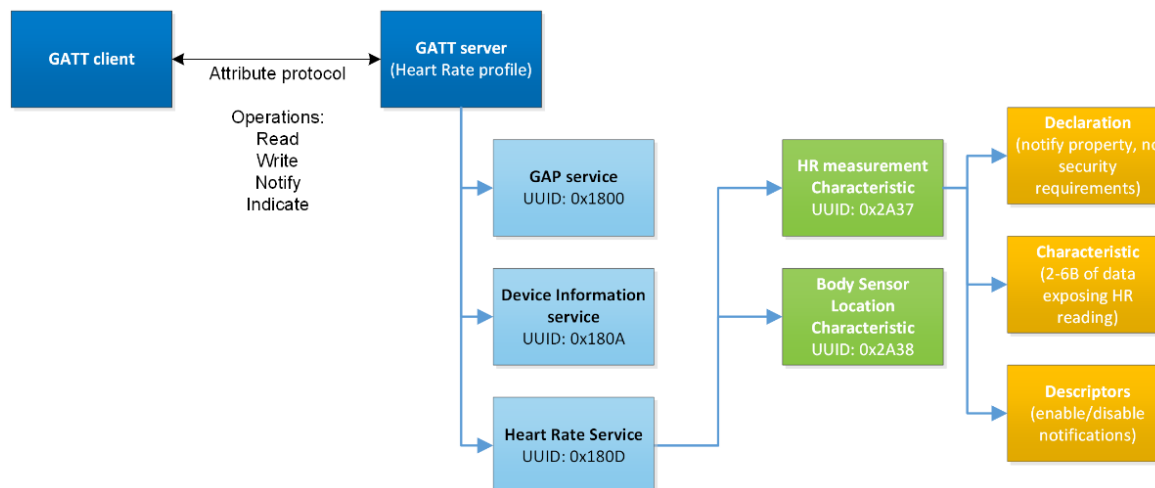
GATT poslužitelj sprema podatke koje prenese ATT protokol i zaprima ATT zahtjeve od GATT klijenta. GATT poslužitelj kod raznih događaja također šalje notifikacije i ukazuje na promjene GATT klijentu. Atributi se nakon prijena protokolom formatiraju kao servisi ili karakteristike.

U BT profilima definirane su sve korištene karakteristike i servisi, no oni također mogu definirati razinu sigurnosti ili parametre potrebne za uspostavljanje veze. Obično profil sadrži jedan ili više servisa koji zadovoljava slučaj primjene (*engl. use-case*) na visokoj razini.

BT servisi su skupovi podataka koji se sastoje od jedne ili više karakteristika. Koriste se da bi ostvarili neku specifičnu funkciju uređaja, kao što je praćenje razine baterije ili temperature.

BT karakteristike imaju definiranu formu, a koriste se u servisima u svrhu izmjene podataka ili kontrole informacija. Sadrže informacije za pristup njihovim vrijednostima, sigurnosne zahtjeve potrebne za pristup i razne deskriptore koji opisuju vrijednost karakteristike.

Profili mogu sadržavati više servisa, a servisi više karakteristika, dok karakteristike obavezno sadrže pojedinačne vrijednosti (slika 24.). Postoje brojni profili, servisi i karakteristike koje je Bluetooth SIG definirala i standardizirala [39], kako bi softverskim tvrtkama omogućila jednostavniji razvoj interoperabilnih uređaja.



**Slika 24. Struktura GATT [38]**

Generični pristupni profil (GAP) na visokoj razini omogućava oglašavanje i skeniranje BLE uređaja, uspostavljanje i upravljanje vezama te emitiranje podataka. GAP omogućava pristup i kontrolu rada LL, čiji je rad opisan ranije. GAP definira uloge uređaja povezane s odašiljanjem ili prijenosom podataka:

- Emiter (*engl. broadcaster*) samo TX – šalje oglasne pakete i emitira podatke
- Osmatrač (*engl. observer*) samo RX – osluškuje oglasne pakete i emitira podatke
- Periferija (*engl. peripheral*) RX i TX – poveziv i može oglašavati, osmišljen za uređaj koji je u mogućnosti uspostaviti samo jednu vezu (s centralom)
- Centrala (*engl. central device*) RX i TX – nikad ne šalje oglašavajuće pakete, osmišljen za uređaj koji uspostavlja i upravlja više veza

Uređaj može podržavati više uloga, ali istovremeno smije obnašati samo jednu ulogu.

GAP također definira načine rada i procedure povezane s pronalaskom i povezivanjem uređaja (tablica 6. i tablica 7.).

Tablica 6. Načini rada BLE uređaja definirani GAP-om [38]

Način rada	Opis	Stanja
Poveziv ( <i>engl. connectable</i> )	Uređaj može uspostaviti vezu	Nepoveziv, poveziv
Vidljiv ( <i>engl. discoverable</i> )	Uređaj je moguće pronaći (trenutno oglašava)	Nevidljiv, limitiran, općenit
Upariv ( <i>engl. bondable</i> )	Ako je uređaj poveziv, uparit će se s povezanim uređajem za uspostavu dugotrajne veze	Neupariv, upariv

Tablica 7. Procedure definirane GAP-om [38]

Procedura	Opis
Pronalazak imena ( <i>engl. name discovery</i> )	Uđi u meni i pronađi ime drugog uređaja. Uređaji s mogućnosti dvostrukog načina rada dijele ime s BR/EDR.
Pronalazak uređaja ( <i>engl. device discovery</i> )	Pretraži uređaje koji su dostupni za uspostavu veze. Pronađi adresu i ime uređaja. Definiraj ulogu uređaja.
Uspostavljanje veze ( <i>engl. link discovery</i> )	Uspostavi vezu nakon odabira uređaja koji trenutno oglašava. Naredi LL da pošalje CONNECT_REQ. Izvrši pronalazak servisa. Pošalji zahtjev za autentifikacijom uređaja. Pošalji zahtjev za korištenje dostupnih GATT servisa.
Pronalazak servisa ( <i>engl. service discovery</i> )	Ovu proceduru koriste uređaji u ulozi centrale ili periferije kako bi pronašli servise na dostupnim uređajima.

Sigurnosne značajke BLE tehnologije usklađene su s Nacionalnim institutom standarda i tehnologija ili odobrene Federalnim standardima procesiranja informacija. BLE tehnologija sadrži osnovne sigurnosne servise:

- Autentikacija i autorizacija – za uspostavljanje veze samo između provjerenih uređaja
- Enkripcija i zaštita podataka – za zaštitu integriteta i povjerljivosti podataka
- Privatnost i povjerljivost – za sprječavanje praćenja uređaja

Sigurnosni model BT tehnologije to omogućava kroz pet sigurnosnih značajki:

1. Povezivanje – proces kreiranja dijeljenih tajnih ključeva

2. Uparivanje – pohrana tajnih ključeva kreiranih pri povezivanju za kasniju upotrebu
3. Autentifikacija uređaja – provjera pohranjenih ključeva
4. Enkripcija – povjerljivost podataka
5. Integritet poruka – zaštita od promjene podataka

Sigurnosni menadžer (SM) brine se o uparivanju, raspodjeli tajnih ključeva i generiranju kratkotrajnih ključeva (*engl. hashing*), dok je LL odgovoran za enkripciju i dekrepciju podataka. BLE tehnologija nudi zaštitu protiv poznatih sigurnosnih prijetnji u bežičnim komunikacijama, kao što su MiTM (*engl. Man in The Middle*), pasivno prisluškivanje (*engl. passive eavesdropping*) i napada privatnosti.

BLE tehnologija koristi AES-CCM kriptografiju koju izvršava LL, koristeći algoritam definiran po FIPS-197 standardu. Za zaštitu od napada na privatnost i za sprječavanje praćenja, BT uređaji imaju dvije adrese, javnu, koju često mijenjaju i privatnu, koja ostaje ista. Javna adresa se generira pomoću ključa za pronalazak identiteta (IRK – *engl. Identity Resolving Key*), koji uređaji izmjene tijekom prethodnog uparivanja. Zbog toga, za pronalazak privatne adrese, uređaji moraju biti prethodno upareni.

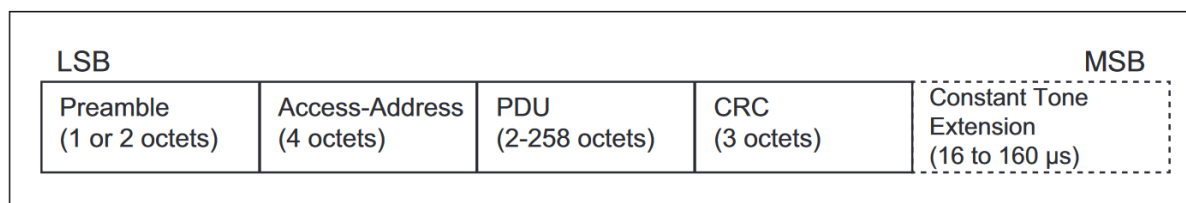
### 3.2. Paketi Bluetooth-a niske energije

BLE tehnologija 5.0+ služi se s četiri različita PHY sloja:

- LE *Uncoded* 1M PHY, 1 Mb/s
- LE *Uncoded* 2M PHY, 2 Mb/s
- LE *Coded* PHY (S=2 kodiranje), 500 kB/s
- LE *Coded* PHY (S=8 kodiranje), 125 kB/s

DF primjene podržane su samo kod LE *Uncoded* PHY slojeva. Iz tog razloga prikazat će se samo struktura LE *Uncoded* paketa.

Struktura paketa LE *Uncoded* 1M i 2M PHY je ista (slika 25.).



**Slika 25. Struktura LE *Uncoded* PHY paketa [40]**

Svaki paket sadrži četiri obavezna polja koja se šalju brzinom određenom vrstom PHY sloja, na način da se najmanje značajan bit (LSB – *engl. Least Significant Bit*) šalje prvi:



- Preambula (*engl. Preamble*)
- Adresa pristupa (*engl. access address*)
- Jedinica podatka protokola (PDU – *engl. Protocol Data Unit*)
- Ciklička provjera redundancije (CRC)

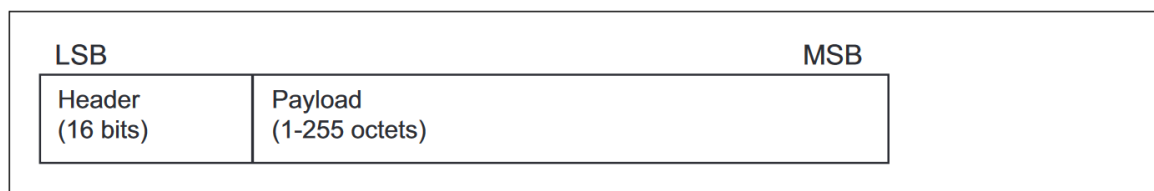
Svi paketi LL sadrže preambulu. Ona se koristi u svrhu sinkronizacije frekvencija prijamnika s odašiljačem, automatskim upravljanjem pojačanja (AGC – *engl. Automatic Gain Control*) odašiljača i estimacije vremena primanja simbola (*engl. symbol timing estimation*). Preambula je fiksna sekvenca izmjenjujućih bitova nula i jedinica. Njena veličina je jedan oktet (osam bitova) za 1M PHY ili dva okteta (16 bitova) za 2M PHY.

Svaka LL veza između dva uređaja ima jedinstvenu adresu pristupa, dugačku četiri okteta (32 bita). Adresa pristupa je nasumična vrijednost koja se generira svaki put kada BLE uređaj to zahtjeva, prema idućim pravilima [41]:

- Vrijednost adrese pristupa ne smije biti ista kao nijedna adresa trenutne LL veze
- Vrijednost adrese pristupa ne smije biti ista kao nijedna adresa trenutnog periodičkog oglašavanja
- Vrijednost ne smije imati više od šest uzastopnih jedinica ili nula
- Vrijednost adrese pristupa ne smije biti ista kao nijedna adresa primarnih ili sekundarnih oglasnih paketa
- Vrijednost se ne smije razlikovati od postojećih adresa za samo jedan bit
- Četiri okteta ne smiju biti međusobno jednaki
- Vrijednost mora imati minimalno dvije tranzicije (0 u 1 ili 1 u 0) u šest najznačajnijih bita (MSB – *engl. Most Significant Bit*)

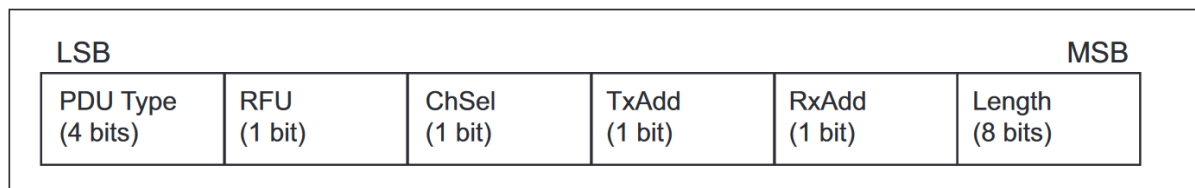
Ako nasumično generirana vrijednost adrese pristupa ne zadovolji ijedno od navedenih pravila, adresa se generira ponovo dok ne zadovolji sve.

U slučaju kada se BLE paket prenosi preko primarnog ili sekundarnog kanala oglašavanja, ili kada se radi o periodičkom oglašavanju, tada je PDU definiran kao PDU fizičkog kanala oglašavanja (*engl. Advertising Physical Channel PDU*) (slika 26.). Kada se paket prenosi preko fizičkog kanala podataka (tj. kada se radi o BLE vezi), tada je PDU definiran kao PDU fizičkog kanala podataka (*engl. Data Physical Channel PDU*) (slika 28.).



**Slika 26. PDU fizičkog kanala oglašavanja [40]**

PDU fizičkog kanala oglašavanja sadrži zaglavlje (*engl. header*) dugačko dva okteta (16 bitova) i podatke varijabilne duljine od 1 do 255 okteta.



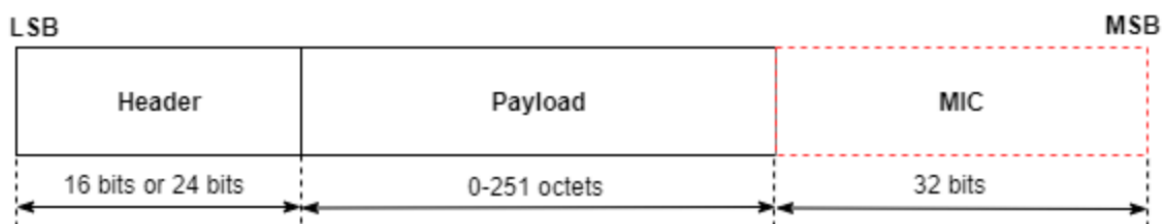
**Slika 27. Zaglavlje PDU fizičkog kanala oglašavanja [40]**

Vrsta PDU (*engl. PDU Type*) na slici 27. definira o kojoj vrsti paketa je riječ. Kako je prikazano u poglavlju 3.1, pomoću kanala primarnog i sekundarnog oglašavanja ne šalju se samo oglasi, već i zahtjevi i odgovori skeniranja.

RFU (*engl. Reserved for Future Use*) polje je prazno, dok polja ChSel, TxAdd i RxAdd sadrže informacije specifične vrsti PDU koja je definirana u prvom polju (PDU Type). Ako PDU Type polje ne definira ChSel, TxAdd, i RxAdd, ta polja ostaju prazna.

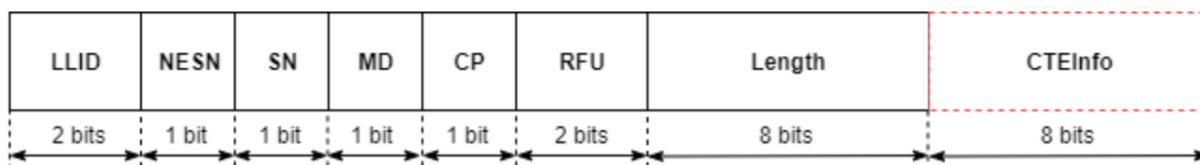
Polje duljina (*engl. length*) označava duljinu podataka u *Payload* polju izraženu u oktetima bitova. Ispravna vrijednost ovog polja je između 1 i 255.

Polje *Payload* sadrži podatke BLE paketa i specifično je ovisno o prvom polju (PDU Type).



**Slika 28. PDU fizičkog kanala podataka [41]**

PDU fizičkog kanala podataka sadrži 16 ili 24-bitno zaglavlje, varijabilno podatkovno polje dugačko od 0 do 255 okteta bitova i može sadržavati 32-bitno polje provjere integriteta poruke (MIC – *engl. Message Integrity Check*). MIC je sadržan samo u slučaju kriptirane veze LL uz uvjet da podatkovno polje nije prazno.



**Slika 29. Zaglavlje PDU fizičkog kanala podataka [41]**

Na početku zaglavlja PDU fizičkog kanala podataka (slika 29.) nalazi se identifikator sloja veze (LLID – *engl. Link Layer Identifier*), koji ukazuje radi li se o LL podatkovnom PDU (*engl. LL data PDU*) ili LL upravljačkom PDU (*engl. LL control PDU*). LL podatkovni PDU šalje podatke L2CAP sloju, a LL upravljački PDU upravlja LL vezom.

Nadalje, LL koristi polje sljedećeg očekivanog broja sekvence (NESN – *engl. Next Expected Sequence Number*) kako bi potvrdio primitak zadnjeg paketa kojeg je povezan uredaj poslao, ili kako bi povezanom uređaju poslao zahtjev za ponovnim slanjem paketa. Zatim se polje broja sekvence (SN – *engl. Sequence Number*) koristi kako bi LL identificirao poslane BLE pakete.

Polje još podataka (MD – *engl. More Data*) javlja da BLE uređaj želi nastaviti sa slanjem podataka. Ako MD bit ni centrale ni periferije ne iznosi jedan, tada periferija zatvara BT vezu. Ako i centrala i periferija imaju MD bit setiran na jedan, tada centrala nastavlja vezu slanjem novog paketa, a periferija mora ostati povezana nakon slanja svog paketa.

CP polje (*engl. CTEInfo Present*) javlja sadrži li paket ekstenziju konstantnog tona (CTE – *engl. Constant Tone Extension*) te sadrži li polje informacije o CTE (*CTEInfo*) koje ukazuje na vrstu i duljinu CTE. Na kraju, polje duljine označava veličinu podataka i MIC u oktetima bitova, ako postoje.

Nakon PDU dolazi polje cikličke provjere redundancije (CRC) (slika 25.), duljine tri okteta (24 bita), gdje se provjeravaju moguće pogreške u nadolazećem paketu. CRC algoritam u ovom slučaju generira 24-bitni kontrolni broj pomoću CRC polinoma (3.1) vršeći XOR operaciju nad podacima.

$$x^{24} + x^{10} + x^9 + x^6 + x^4 + x^3 + x + 1 \quad (3.1)$$

Pri zaprimanju paketa, ponovno se izvršava CRC algoritam. Ako 24-bitni kontrolni broj iznosi nula nakon izvršavanja algoritma, podaci nisu oštećeni prilikom prijensa.

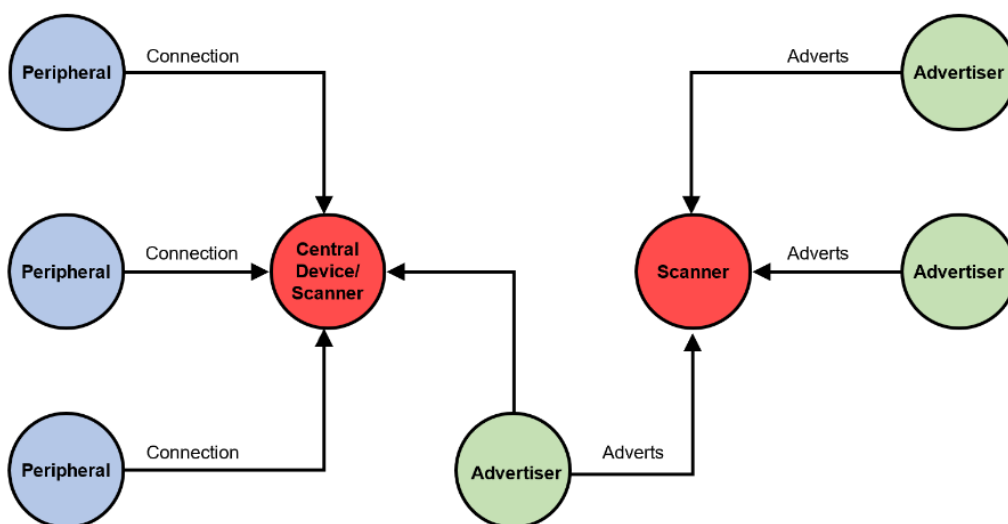
Na kraju BLE paketa dolazi CTE, koji nije obavezan. CTE je zapravo nemodulirani noseći signal koji je vrlo bitan kod DF primjena.

### 3.3. Topologije mreža Bluetooth-a niske energije

Moguće uloge BLE uređaja u mreži slične su onima u GAP-u, kako je već opisano u poglavlju 3.1.

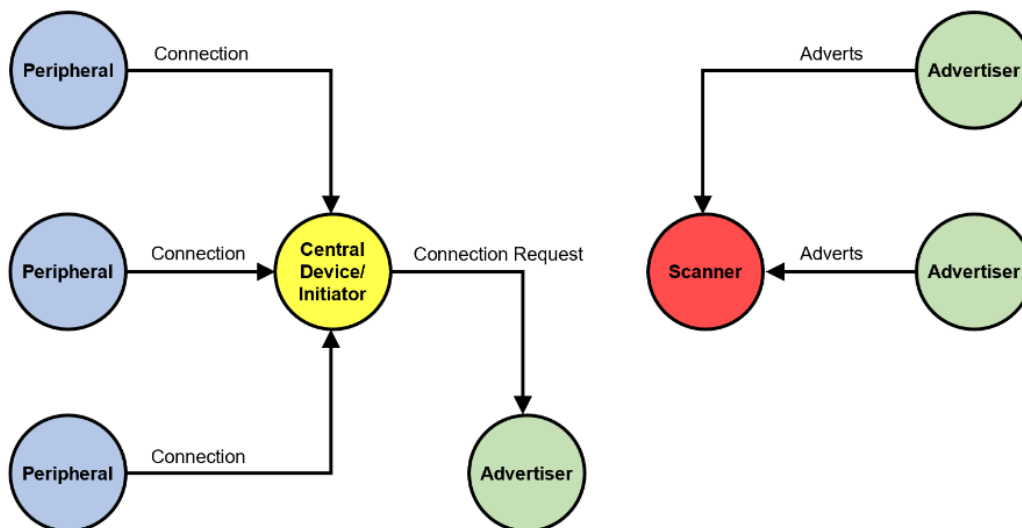
- Oglašivač – uređaj koji emitira oglasne pakete, ali ih ne može primiti. Sposoban je dopustiti ili odbiti povezivanje
- Skener (*engl. scanner*) – uređaj koji isključivo osluškuje oglasne pakete. Sposoban je povezati se s oglašivačem
- Periferija – uređaj koji je povezan s isključivo jednom centralom (BT 4.0) ili više njih (BT 4.1+)
- Centrala – uređaj koji je povezan s jednom ili više periferija. U teoriji, centrala može imati neograničen broj povezanih uređaja, ali u praksi se radi o četiri do 20 uređaja povezanih odjednom
- Hibrid (*engl. hybrid*) – uređaj koji vrši više uloga istovremeno. Ovo je moguće samo u specifičnim primjenama podržanim kod nekih proizvođača.

Slika 30. prikazuje primjer jedne topologije BLE mreže.



Slika 30. Primjer topologije BLE mreže [38]

Uređaji mogu također mijenjati uloge, pa tako i topologiju mreže (slika 31.).

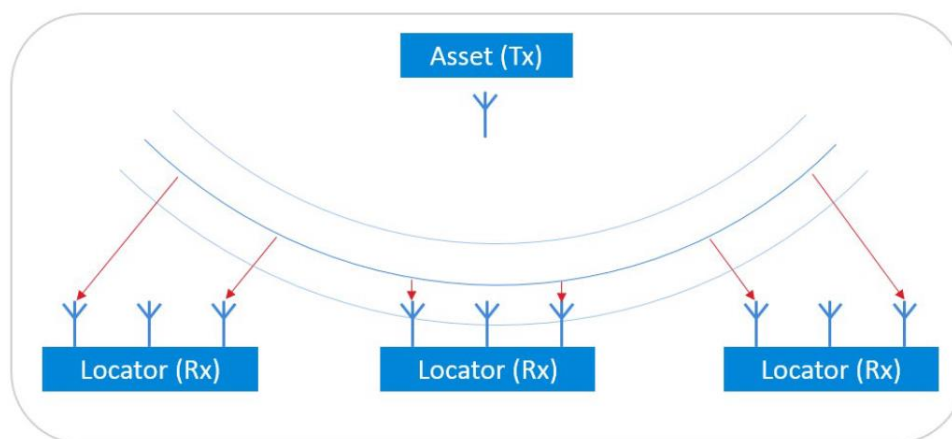


Slika 31. Promjena topologije BLE mreže [38]

#### 4. OSNOVE ODREĐIVANJA SMJERA SIGNALA

Određivanje smjera signala (DF) odnosi se na postupke utvrđivanja smjera iz kojeg je radio signal primljen ili smjera u kojem je poslan. DF je bitan u mnogim primjenama, a najviše se koristi u vojne svrhe, svrhe nadzora, svrhe potrage i spašavanja (*engl. search and rescue*) ili svrhe navigacije i pozicioniranja. Postoje dvije DF metode, metoda kuta dolaska (AoA – *engl. Angle of Arrival*) i metoda kuta odlaska (AoD – *engl. Angle of Departure*).

U metodi kuta dolaska (AoA), traženi odašiljač šalje signal kojeg primaju prijammnici koji su u mogućnosti odrediti relativni smjer iz kojeg signal dolazi. Ako se nekoliko prijammnika postave jedan pored drugog, radio valovi koje emitira odašiljač stići će do različitih antena u različito vrijeme, pa će se njihovi valovi razlikovati u fazi  $\varphi$ . Iz te razlike može se zatim raznim algoritmima izračunati smjer iz kojeg je stigao signal, relativno poziciji prijammnika (slika 32.).

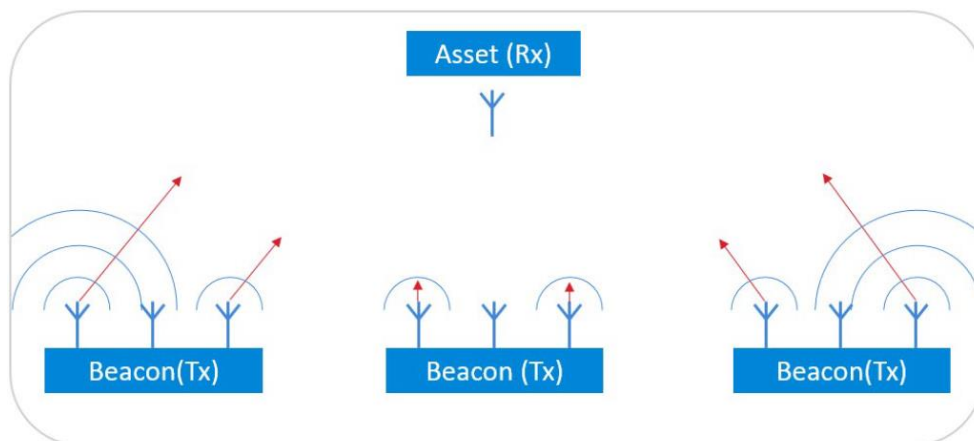


Slika 32. Estimacija kuta dolaska [42]

Za računanje kuta dolaska potrebni su preduvjeti da je signal nedomuliran (signal koji ne mijenja svoju frekvenciju) i da je udaljenost između antena prijammnika manja od pola valne duljine signala. Samo u tom slučaju razlika u fazi jednoznačno određuje kut dolaska. U ovoj metodi:

- Odašiljač odašilje nedomulirani uskopojasni signal u nekom vremenu
- Prijammnik uzorkuje primljeni signal na više antena

U metodi kuta odlaska (AoD) ovaj postav je obrnut. Ako nekoliko antena odašilju valove s istom početnom fazom, tada pojedinačna antena može izmjeriti razlike u fazi različitih dolaznih radiovalova. Iz te razlike može se zatim raznim algoritmima izračunati smjer iz kojeg je signal primljen, relativan poziciji odašiljača (slika 33.).



**Slika 33. Estimacija kuta odlaska [42]**

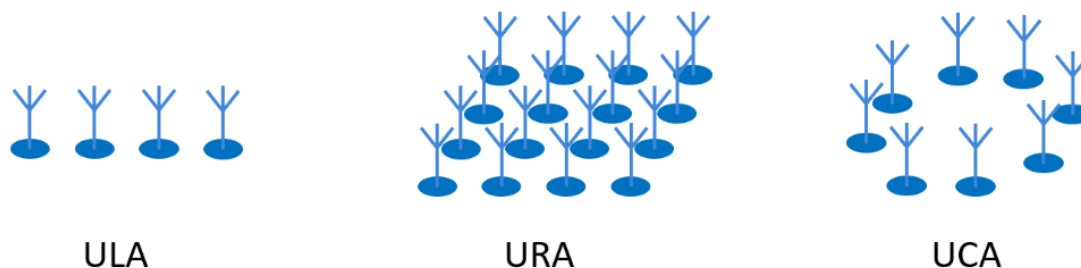
Za računanje kuta odlaska također postoji preduvjet da odašiljač mora odašiljati signal s istom frekvencijom na svim antenama. Zbog toga antene ne smiju odašiljati signale istovremeno, jer bi oni tada međusobno interferirali. Odašiljači zato sekvencijalno izmjenjuju odašiljajuće antene, a prijamnik dobiva informacije sekvence i vremenskog intervala izmjenjivanja. U ovoj metodi:

- Odašiljač odašilje nemodulirani signal s nekoliko antena koristeći vremensku podjelu (antene odašilju signale sekvencijalno)
- Prijamnik uzorkuje signale tih antena koristeći tu istu vremensku podjelu

AoA i AoD metode slične su po načinu na koji se računa traženi kut signala, ali različite su iz perspektive primjene. AoA se koristi u primjenama kao što su traženje predmeta u velikom skladištu ili sl., dok se AoD koristi kada uređaj želi sam pronaći svoju poziciju bez da ju znaju ostali uređaji, npr. ako kupac želi saznati svoju poziciju u velikom šoping centru. Za primjenu u ovom radu koristit će se AoA ili DoA (*engl. Direction of Arrival*) estimacija.

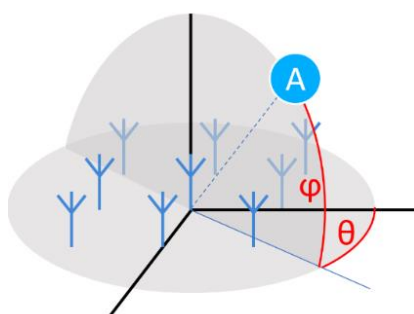
Kako je već navedeno, za DF je uvijek potrebno više od jedne antene. Te su antene najčešće poredane jedna do druge s razmakom većim od polovice valne duljine signala. Više međusobno uparenih antena koje imaju cilj zajedno obnašati neku funkciju nazivaju se nizovi antena (*engl. antenna array*).

Postoje različite konfiguracije nizova antena (slika 34.), a to su ujednačeni linearni niz (ULA – *engl. Uniform Linear Array*), ujednačeni kvadratni niz (URA – *engl. Uniform Rectangular Array*) i ujednačeni kružni niz (UCA – *engl. Uniform Circular Array*).



Slika 34. Različite konfiguracije nizova antena [42]

Koristeći ULA, moguće je izmjeriti samo kut azimuta, u rasponu od 0 do 180 stupnjeva zbog simetrije. Sa dodavanjem antena po još jednoj osi, u slučaju URA i UCA, moguće je izmjeriti kut azimuta  $\theta$  i kut elevacije  $\varphi$  (slika 35.).



Slika 35. Kut azimuta i elevacije [42]

Pomoću URA i UCA moguće je izmjeriti navedene kutove u 3D poluprostoru, zbog simetrije. Teoretski, dodavanjem antena po još jednoj osi moguće je izmjeriti tražene kutove po cijelom 3D prostoru.

#### 4.1. Ekstenzija konstantnog tona Bluetooth-a niske energije

Kako bi DF pomoću BLE tehnologije uopće bio moguć, potrebno je uzorkovati nemodulirani signal. Za odašiljanje nemoduliranog signala zaslužan je ekstenzija konstantnog tona Bluetooth-a niske energije (CTE – *engl. Constant Tone Extension*), predstavljena u BT 5.1 specifikaciji.

BLE CTE servis je GATT servis koji omogućuje klijentu da podesi CTE koji odašilje odašiljač. CTE servis sadrži karakteristike opisane u tablici 8.



Tablica 8. Karakteristike BLE CTE servisa [43]

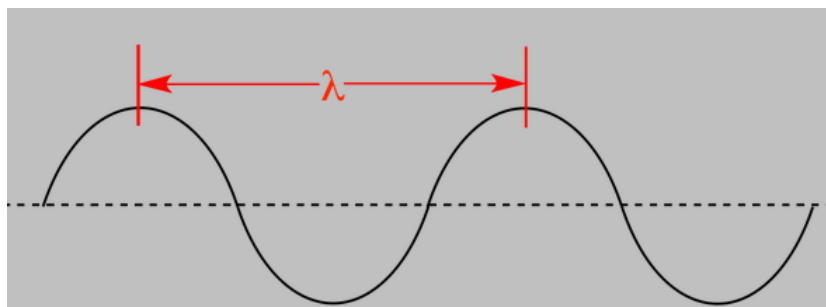
Ime karakteristike	Vrijednost	Opis
Omogući CTE	0 ili 1	Način primjene CTE, 0 za AoA, 1 za AoD
Minimalna duljina oglašivačkog CTE	između 2 i 20	Definira minimalnu dopuštenu duljinu CTE u 8 $\mu\text{s}$ (16 do 160 $\mu\text{s}$ )
Minimalan brojač odašiljanja oglašivačkog CTE	1 do 15	Minimalan broj puta odašiljanja CTE u svakom CTE intervalu
Duljina trajanja odašiljanja oglašivačkog CTE	N (0 do 255)	Vremensko razdoblje u kojem server odašilje pakete koji sadrže CTE, $1, 1^{N-64}$ s
Interval oglašivačkog CTE	0x0006 – 0xFFFF	Interval u kojem server odašilje pakete koji sadrže CTE, $N*1,25$ ms
PHY oglašivačkog CTE	0 ili 1	0 za LE 1M PHY, 1 za LE 2M PHY

## 4.2. Trivijalno rješenje

Slučaj: signal dolazi s nepoznatog kuta  $\theta$  na dvije antene. Dolazni signal putuje brzinom svjetlosti  $c$  te najprije dolazi do prve antene, gdje mu faza iznosi  $\varphi_1$ . Malo kasnije, signal dolazi do druge antene te mu zbog kašnjenja faza iznosi  $\varphi_2$ . Moguće je izračunati razliku u fazi pomoću 4.1.

$$\psi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (4.1)$$

Valna duljina definirana je kao udaljenost od vrha do vrha vala (ili od dola do dola vala) (slika 36.).

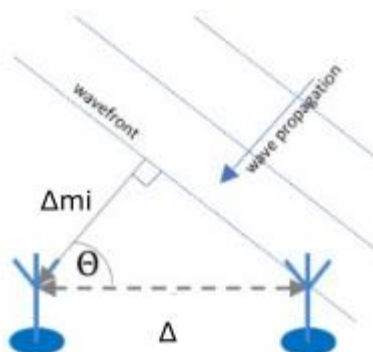


Slika 36. Valna duljina [44]

Kada razlika u fazi  $\psi$  na antenama iznosi  $2\pi$ , znači da je udaljenost koju je signal prešao do druge antene veća za  $\lambda$ . Tu dodatnu prijeđenu udaljenost moguće je izraziti kao omjer razlike u fazi u pune faze ( $2\pi$ ), pomnožen s valnom duljinom (4.2).

$$\Delta_m = \frac{\psi}{2\pi} \lambda \quad (4.2)$$

Ako je prijammnik dovoljno daleko od odašiljača (bar tri do četiri valne duljine), pretpostavlja se da je fronta signala planarna (slika 37.).



Slika 37. Kut signala [42]

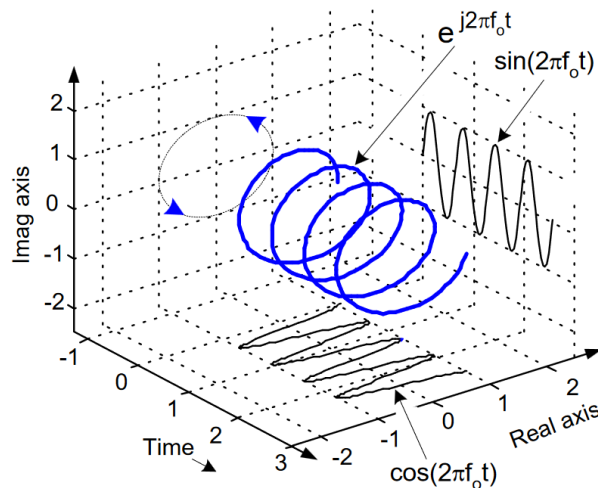
Zatim je trigonometrijom u 4.3 jednostavno izračunati kut signala.

$$\theta = \arccos\left(\frac{\Delta_{mi}}{\Delta}\right) \quad (4.3)$$

Za realne primjene bitno je da je razmak antena  $\Delta$  manji od polovice valne duljine, tako da je vrijednost  $\psi$  između  $0^\circ$  i  $180^\circ$ . Zbog šuma, moguć je slučaj da faza koja je u stvarnosti  $175^\circ$  postane  $185^\circ$ , što je jednako fazi od  $-175^\circ$ . Za relativno malu razliku prouzročenu šumom ove vrijednosti daju vrlo različite kutove.

### 4.3. IQ uzorkovanje

Kod DF primjena signal se uzrokuje kvadraturnim uzorkovanjem (*engl. quadrature sampling*). Kvadraturno uzorkovanje, još nazvano IQ uzorkovanjem (*engl. In-Phase and Quadrature-Phase sampling*), daje preciznu reprezentaciju realnog signala. IQ uzorkovanje uzorkuje signal u dvije različite faze, međusobno udaljene  $90^\circ$ . Na taj način dobiva se projekcija realnog signala u dvije ravnine, prikazane na slici 38.



Slika 38. Projekcije dobivene IQ uzorkovanjem [45]

IQ uzorkovanjem moguće je zatim rekonstruirati realan uzorkovani signal s informacijama dobivenim o njegovoj amplitudi i fazi.

#### 4.4. Algoritmi traženja smjera dolaska

Matematički problem estimacije kuta dolaska signala za zadane IQ podatke sam po sebi je jednostavan, kako je pokazano u poglavlju 4.2. Problem nastaje kod primjena u pravom svijetu, gdje postoje brojne interferencije signala i nesavršenosti hardvera. Koristeći robusne algoritme kao što su klasični *beamformer* (engl. *Classical Beamformer*), MUSIC (engl. *Multiple Signal Classification*) ili ESPRIT (engl. *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) moguće je postići zadovoljavajuće rezultate, ali za to je potrebna veća procesorska snaga hardvera.

Kod formiranja svih algoritama traženja smjera dolaska (DoA – engl. *Direction of Arrival*) javljaju se iste pretpostavke [46]:

- Izotropični i linearni medij – svojstva propagacije signala ne mijenjaju se obzirom na njegov kut ili udaljenost
- Daleko polje (engl. *far-field*) – izvor svih signala dovoljno je udaljen da je njihova valna fronta planarna
- Uski pojas (engl. *narrowband*) – signali imaju istu frekvenciju nosećeg signala, matematički:

$$s_i^r(t) = \alpha_i(t) \cos[2\pi f_c t + \beta_i(t)], 1 \leq i \leq d \quad (4.4)$$

- Pretpostavka šuma - svi šumovi u kanalu su AWGN (engl. *Additive White Gaussian Noise*)



Ako se izraze svi signali generirani od  $d$  broja izvora signala, svi ti signali i šumovi primljeni na  $m$ -toj anteni mogu se izraziti pomoću 4.11 i 4.12 (matrični oblik).

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^d s_i(t) + n_m(t) = s_i(t) \sum_{i=1}^d e^{j(m-1)\mu_i} + n_m(t), \quad m = 1, 2 \dots M \quad (4.11)$$

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{a}(\mu_1), \mathbf{a}(\mu_2) \dots \mathbf{a}(\mu_d)] \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_d(t) \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4.12)$$

Gdje:

$\mathbf{x}(t) = [x_1(t)x_2(t) \dots x_M(t)]^T$  je vektor stupac podataka koje je niz antena primio.

$\mathbf{s}(t) = [s_1(t)s_2(t) \dots s_M(t)]^T$  je vektor stupac svih signala izvora.

$\mathbf{n}(t) = [n_1(t)n_2(t) \dots n_M(t)]^T = \sigma_N^2 \mathbf{I}_M$  je vektor prostorno nekoreliranih šumova.

Vektor stupac  $\mathbf{a}(\mu_i)$  još se naziva i vektor skretanja (*engl. steering vector*) i definiran je pomoću 4.13. Definira matricu skretanja niza antena  $\mathbf{A}$  (*engl. array steering matrix*) veličine  $M \times d$ , prikazanu 4.14.

$$\mathbf{a}(\mu_i) = [1 \quad e^{j\mu_i} \quad e^{j2\mu_i} \quad e^{j(M-1)\mu_i}]^T \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [\mathbf{a}(\mu_1) \dots \mathbf{a}(\mu_i) \dots \mathbf{a}(\mu_d)] = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j\mu_1} & e^{j\mu_2} & \dots & e^{j\mu_d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{j(M-1)\mu_1} & e^{j(M-1)\mu_2} & \dots & e^{j(M-1)\mu_d} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

U realnim uvjetima, signali koje prima niz antena su ispunjeni šumovima. Ti šumovi obično su nekorelirani, za razliku od signala koji su korelirani jer dolaze iz istog izvora. Zbog ovog svojstva moguće je dobiti informaciju o kutu dolaska signala, koristeći matricu kovarijanci, definiranu u 4.15.

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} \quad (4.15)$$

Uvrštavanjem 4.12 u 4.15:

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_N^2 \mathbf{I}_M \quad (4.15)$$

$$\mathbf{R}_{ss} = E\{\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)\} \quad (4.16)$$

U praktičnim primjenama teško je pronaći matricu kovarijanci  $\mathbf{R}_{xx}$  zbog ograničenog broja podataka koje niz antena dobiva. Zbog toga se matrica kovarijanci obično estimira promatranjem prosjeka  $N$  dobivenih podataka u nekom danom vremenu.

$$\begin{aligned}
\mathbf{X} &= [x(t_1) \quad x(t_2) \quad \dots \quad x(t_N)]^T = \\
&= \mathbf{A}[s(t_1) \quad s(t_2) \quad \dots \quad s(t_N)]^T + [n(t_1) \quad n(t_2) \quad \dots \quad n(t_N)]^T = \\
&= \mathbf{AS} + \mathbf{N}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\mathbf{R}_{xx} \approx \hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n)x^H(t_n) = \frac{1}{N} \mathbf{X}^H \mathbf{X} \tag{4.18}$$

#### 4.4.1. Classical Beamformer algoritam

Glavna ideja kod *beamformer* pristupa je okretanje niza antena u različitim smjerovima i mjerenje izlazne snage. Izlazna snaga će biti maksimalna kada se smjer okretanja poklapa sa smjerom dolaznog signala. Naravno, niz antena može se okretati elektronički dodavanjem težinskog faktora u traženom smjeru signala, korištenjem težinskog vektora  $\mathbf{w}$ .

$$y(t) = \mathbf{w}^H x(t) \tag{4.19}$$

Zatim se ukupna prosječna snaga niza antena tijekom  $N$  snimaka podataka (*engl. snapshot*) može prikazati s 4.20.

$$P(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(t_n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{w}^H x(t_n)x^H(t_n)\mathbf{w} = \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}}_{xx} \mathbf{w} \tag{4.20}$$

Kod klasičnog *beamformera*, težinski vektor  $\mathbf{w}$  jednak je vektoru skretanja  $\mathbf{a}$  s proizvoljnim kutem  $\theta$ , gdje algoritam traži dolazeći signal.

$$\mathbf{a}(\theta) = [1 \quad e^{j\mu_1} \quad e^{j2\mu_1} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\mu_1}]^T, \quad \mu_1 = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta \sin\theta \tag{4.21}$$

Za svaki smjer  $\theta$  računa se prosječna snaga pomoću 4.20. Smjer za koji je izračunata najveća snaga, može se pretpostaviti kao smjer dolaska signala. U praktičnim primjenama  $\mathbf{w}$  se normalizira sa 4.22. Uvrštavanjem 4.22 u 4.20 dobiva se snaga kao funkcija smjera dolaska  $\theta$ .

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{a}(\theta)}{\sqrt{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}} \tag{4.22}$$

$$P(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{R}}_{xx}\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)} \tag{4.23}$$

#### 4.4.2. MUSIC algoritam

MUSIC algoritam nastao je 1979. godine, a temelji se na dekompoziciji svojstvenih vrijednosti matrice kovarijanci signala. Potprostor signala i šuma računaju se pomoću matrične algebre i ortogonalni su jedan na drugi. MUSIC algoritam to koristi kako bi izolirao potprostor signala od potprostora šuma [47]. Kako bi se pronašao smjer dolaska signala, potrebno je pretražiti cijelu matricu skretanja i izdvojiti one vektore koji su ortogonalni.

Ako svojstvene vrijednosti matrice kovarijanci  $\mathbf{R}_{xx}$  iznose  $\{\lambda_1, \dots, \lambda_M\}$  onda vrijedi:

$$|\mathbf{R}_{xx} - \lambda_i \mathbf{I}_M| = 0 \quad (4.24)$$

Uvrštavanjem 4.24 u 4.15, te pretpostavkom da su svojstvene vrijednosti  $\mathbf{AR}_{ss}\mathbf{A}^H$  jednake  $e_i$ , dobiva se 4.26.

$$|\mathbf{AR}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_N^2 \mathbf{I}_M - \lambda_i \mathbf{I}_M| = 0 \quad (4.25)$$

$$e_i = \lambda_i - \sigma_N^2 \quad (4.26)$$

Kada je broj izvora signala  $d$  manji od broja antena u nizu antena  $M$ , matrica  $\mathbf{AR}_{ss}\mathbf{A}^H$  je pozitivno semidefinitna matrica ranga  $d$ . To znači da  $M - d$  svojstvenih vrijednosti,  $e_i$  od  $\mathbf{AR}_{ss}\mathbf{A}^H$  iznose nula. 4.26 nalaže da je onda  $M - d$  svojstvenih vrijednosti  $\mathbf{R}_{xx}$  jednako varijanci šuma  $\sigma_N^2$  i da su također te svojstvene vrijednosti najmanje.

$$\lambda_{min} = \sigma_N^2 \quad (4.27)$$

Kada se odredi multiplicitet  $k$  najmanje svojstvene vrijednosti  $\lambda_{min}$ , putem relacije 4.28 može se estimirati broj izvora signala.

$$d = M - k \quad (4.28)$$

Svojstveni vektor  $\mathbf{q}_i$  povezan s određenom svojstvenom vrijednosti zadovoljava izraz 4.29.

$$(\mathbf{R}_{xx} - \lambda_i \mathbf{I}_M)\mathbf{q}_i = 0 \quad (4.29)$$

Kada se uvrsti 4.15 u 4.29, slijedi 4.30.

$$(\mathbf{R}_{xx} - \sigma_i \mathbf{I}_M)\mathbf{q}_i = \mathbf{AR}_{ss}\mathbf{A}^H \mathbf{q}_i + \sigma_N^2 \mathbf{I}_M \mathbf{q}_i - \sigma_N^2 \mathbf{q}_i = \mathbf{AR}_{ss}\mathbf{A}^H \mathbf{q}_i = 0 \quad (4.30)$$

Matrica  $\mathbf{A}$  je punog ranga, a  $\mathbf{R}_{ss}$  je nesingularna, što znači da je  $\mathbf{A}^H \mathbf{q}_i = 0$ . Ovaj izraz govori da su svojstveni vektori povezani s  $M - d$  najmanjih svojstvenih vrijednosti ortogonalni s  $d$  vektora skretanja koji sačinjavaju matricu skretanja  $\mathbf{A}$ .

$$\{\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_d)\} \perp \{\mathbf{q}_{d+1}, \dots, \mathbf{q}_M\} \quad (4.31)$$

Izraz 4.31 čini temelj svih metoda baziranih na potprostoru. Estimacija traženih vektora skretanja koji su povezani s dolaznim signalima moguća je pronalaskom onih vektora skretanja koji su ortogonalni s  $M - d$  svojstvenih vektora povezanih sa svojstvenim vrijednostima matrice kovarijanci  $\mathbf{R}_{xx}$ , približno jednakih  $\sigma_N^2$ .

Svojstveni vektori matrice kovarijanci  $\mathbf{R}_{xx}$  mogu pripadati jednom od dva potprostora, potprostoru signala ili potprostoru šuma. Vektori skretanja koji odgovaraju traženom smjeru dolaska nalaze se u potprostoru signala i ortogonalni su na potprostor šuma. Pretraživanjem svih mogućih vektora skretanja da se pronađu oni koji su okomiti prostoru određenom sporednim svojstvenim vektorima, moguće je pronaći smjer dolaska signala.

Potprostor šuma formira se pomoću matrice  $\mathbf{V}$  koja sadrži svojstvene vektore šuma, 4.32.

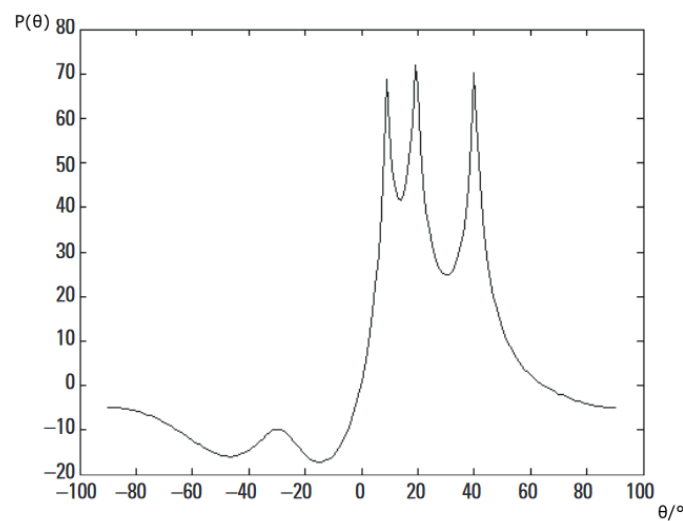
$$\mathbf{V}_n = [\mathbf{q}_{d+1}, \dots, \mathbf{q}_M] \quad (4.32)$$

$$\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{V}_n\mathbf{V}_n^H\mathbf{a}(\theta) = 0, \quad \text{za } \theta = \theta_i \quad (4.33)$$

4.33 vrijedi za sve kutove  $\theta_i$  koji odgovaraju smjeru dolaznog signala. Zatim je konačno moguće dobiti snagu u funkciji smjera dolaska  $\theta$ , izrazom 4.34.

$$P(\theta) = P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{V}_n\mathbf{V}_n^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (4.34)$$

Pomoću MUSIC algoritma je na taj način moguće estimirati smjerove više dolaznih signala, promatrajući područja najveće snage dobivene u 4.34, tj.  $d$  najvećih vrhova na slici 40.



**Slika 40. Estimacija DOA s MUSIC algoritmom, smjerovi radio signala su  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  i  $40^\circ$  [46]**

MUSIC algoritam može se sažeti u pet koraka:

1. Prikupi ulazne uzorke signala  $\mathbf{x}(t_n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  i estimiraj matricu kovarijanci pomoću 4.18
2. Napravi dekompoziciju  $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$  na svojstvene vrijednosti:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}\mathbf{V} = \mathbf{V}\Lambda \quad (4.35)$$

Gdje su  $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ ,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$ , svojstvene vrijednosti, a  $\mathbf{V}$  sadrži svojstvene vektore  $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ .

3. Estimiraj multiplicitet  $k$  najmanje svojstvene vrijednosti  $\lambda_{min}$ , a zatim pomoću 4.28 izračunaj broj signala  $d$ .
4. Izračunaj spektar MUSIC algoritma pomoću 4.34.  $\mathbf{V}_n = [\mathbf{q}_{d+1}, \dots, \mathbf{q}_M]$ , gdje su  $\mathbf{q}_l$ ,  $l = d + 1, d + 2, \dots, M$  svojstveni vektori povezani s najmanjom svojstvenom vrijednosti  $\lambda_{min}$ .



5. Pronađi  $d$  najvećih vrhova  $P_{MUSIC}(\theta)$  kako bi dobio estimacije DOA.

#### 4.4.3. *ESPRIT algoritam*

ESPRIT algoritam vrlo je popularan algoritam za estimaciju kuta dolaska signala koji je također baziran na potprostoru. ESPRIT je sposoban postići dobru rezoluciju, a primjenjuje se na nizovima antena čije se geometrije sastoje od barem dva identična podniza antena. Također, može se koristiti samo na nizovima antena čije su geometrije prostorno invarijantne. Osnovna tri koraka bilo koje verzije ESPRIT algoritma su sljedeća:

1. Estimacija potprostora signala – Računanje bazne matrice za estimirani potprostor signala
2. Rješenje jednadžbe invarijacije – Rješenje (obično) predefiniranog sustava jednadžbi (jednadžba invarijance), izvedenog iz spomenute bazne matrice
3. Estimacija DOA – Računanje svojstvenih vrijednosti rješenja jednadžbe invarijance iz prethodnog koraka

U matematičku pozadinu ESPRIT algoritma neće se ulaziti u ovom radu, ali je detaljno objašnjena u knjizi Chen, Z. i sur. [46], poglavlje 5.

## 5. ODABRANI HARDVER

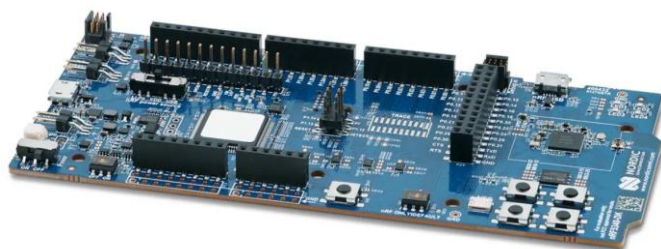
Na tržištu postoji nekoliko proizvođača koji prodaju razne proizvode za DF pomoću BLE tehnologije. Postoje gotova rješenja, kompanija kao što su *Dusun IoT* [48] ili *Feasycom* [35], AoA kompleti (*engl. AoA kit*), kompanija kao što su *U-Blox* [32] ili *SiliconLabs* [49] i razvojni kompleti (DK - *engl. development kit*), kompanije *NordicSemiconductors* [50].

Gotova rješenja (slika 41.) sastoje se od tri (ili više) lokatora koji triangulacijom određuju poziciju BLE odašiljača. Ovakva rješenja najčešće nije moguće prilagoditi traženim zahtjevima ni prilagoditi pisanjem vlastitog koda. Zbog specifične primjene koja je potrebna u ovom radu sustavi gotovih rješenja nisu se razmatrali.

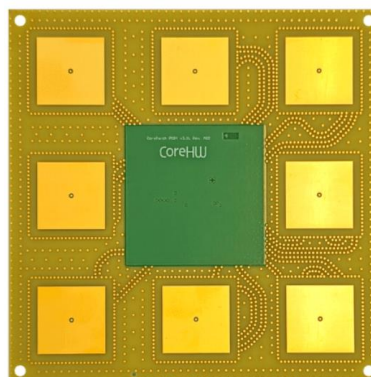


Slika 41. Dusun IoT AoA BLE lokator [48]

Razvojni kompleti (slika 42.a) koji se koriste za BLE AoA, kao što su *Nordic nRF5340* ili *nRF52833*, moguće je prilagoditi specifičnoj primjeni, ali je programski kod potrebno napisati od početka u cijelosti. Također, takve DK potrebno je upariti s nizom antena proizvođača kao što je *CoreHW* (slika 42.b) i odašiljačima. Iz razloga što *NordicSemiconductors* ne proizvodi vlastite nizove antena i zbog potrebe pisanja opsežnog programskog koda kako bi hardver različitih proizvođača bio međusobno kompatibilan, odustalo se i od nabave razvojnih kompleta.

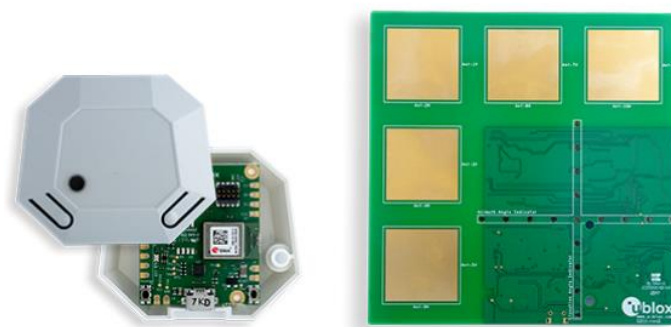


Slika 42.a Nordic nRF5340 DK [50]



Slika 42.b CoreHW ANT1-1.0 [51]

AoA kompleti (slika 43.) su kompleti osmišljeni za brzo prototipiranje i testiranje raznih sustava za lokalizaciju pomoću BLE tehnologije. Kupnjom AoA kompleta dobiva se polje antena te mikrokontroler za to polje, koji su kompatibilni *out-of-the-box* jer je taj dio programskog koda već napisao proizvođač. Neki proizvođači, kao što su *U-Blox*, nude i kompatibilne preprogramirane odašiljače za mogućnost brzog testiranja sustava. Većina AoA kompleta ima napisane razne primjere primjena po kojima se programski kod može prilagoditi vlastitoj potrebi. Iz tog razloga odlučena je kupnja AoA kompleta.



**Slika 43. U-blox XPLR-AOA-1 kit [32]**

Glavni proizvođači koji nude AoA komplete su *U-blox*, *SiliconLabs* i *InsightSiP*. Za *InsightSiP* komplet dostupna je ograničena dokumentacija, tako da se odabir sveo na *U-blox* ili *SiliconLabs*. *U-Blox XPLR-AOA-3* [52] je AoA komplet koji se sastoji od URA s osam antena, mikrokontrolera za URA, *EVB-ANT-1* i jednog odašiljača *C209*. *SiliconLabs BG22-PK6022A* sadrži URA s 16 dvostruko polariziranih antena i mikrokontroler *BRD4002A* za spomenuti URA.

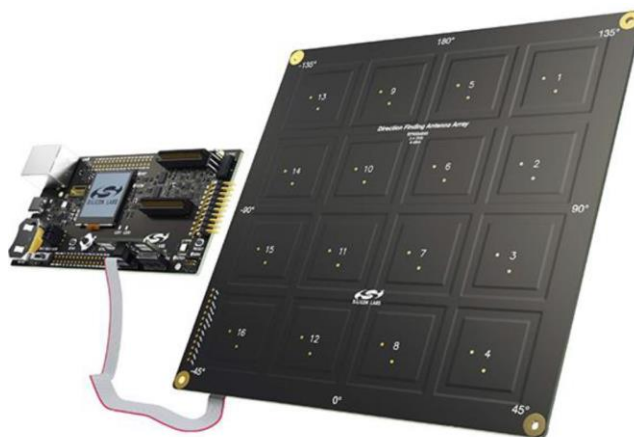
**Tablica 9. Usporedba XPLR-AOA-3 i BG22-PK6022A**

Naziv	XPLR-AOA-3	BG22-PK6022A
Sadrži	C209 odašiljač, mikrokontroler, i URA	Mikrokontroler i URA
Broj antena	8, dvostruko polariziranih	16, dvostruko polariziranih
WiFi na kontroleru?	Da	Ne
Mogućnost kupnje dodatnih odašiljača	Ne	Da
Cijena ( <i>mouser</i> )	382 €	289 €

Iz usporedbe u tablici 9., jasno je da oba proizvođača nude poprilično slične i kompetentne AoA komplete. Presudan faktor je, međutim, bila cijena i mogućnost zasebne kupnje dodatnih odašiljača. Iz tog razloga odlučena je kupovina *SiliconLabs* BG22-PK6022A.

### 5.1. Prijamnik

Odabrani AoA komplet sadrži mikrokontroler BRD4002A i BRD4191A-BG22 dvostruko polarizirani URA radio ploču (slika 44.).



**Slika 44. SiliconLabs AoA komplet [49]**

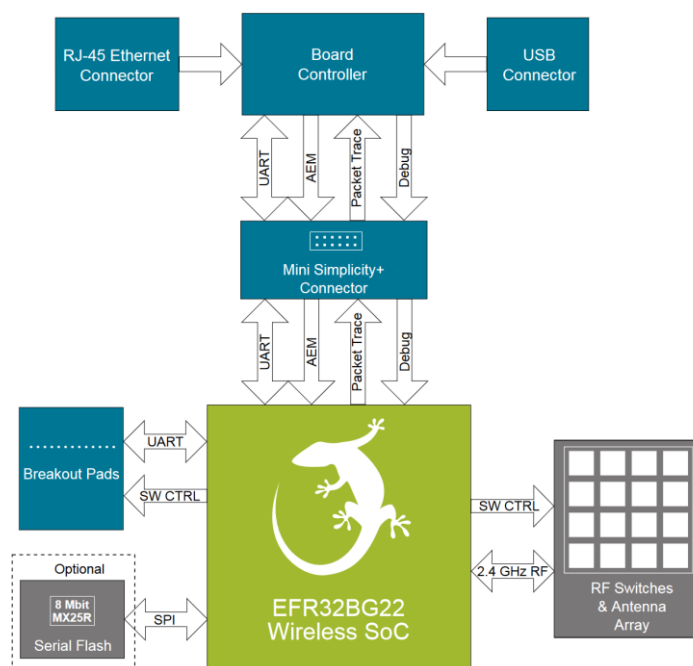
BRD4002A mikrokontroler je za sve radio ploče *SiliconLabs*-a. Sadrži Ethernet priključak i USB-C priključak, a s URA je povezan preko *Simplicity* + nestandardnog 12-pinskog kabela. Mikrokontroler sadrži 128x128 pikselni LCD zaslon za prikazivanje osnovnih informacija i senzore temperature i vlažnosti zraka. Na pločici se nalazi i *Segger*-ov *J-Link debugger* koji omogućava *flashanje* i *debugiranje* putem USB-C. Pločica se napaja putem USB-C ili pomoću 3 V CR2032 gumb-baterije [53].

BRD4191A-BG22 je URA ploča koja sadrži EFR32-BG22C224F512IM40 mikročip i 16 dvostruko polariziranih antena za radio primjene u 2,4 GHz pojasu. Navedeni mikročip je u SoC (*engl. System on Chip*) obliku, a temelji se na ARM Cortex-M33 procesoru. Kompletne specifikacije EFR32-BG22 prikazane su u tablici 10.

**Tablica 10. Specifikacije EFR32-BG22C224F512IM40 [54]**

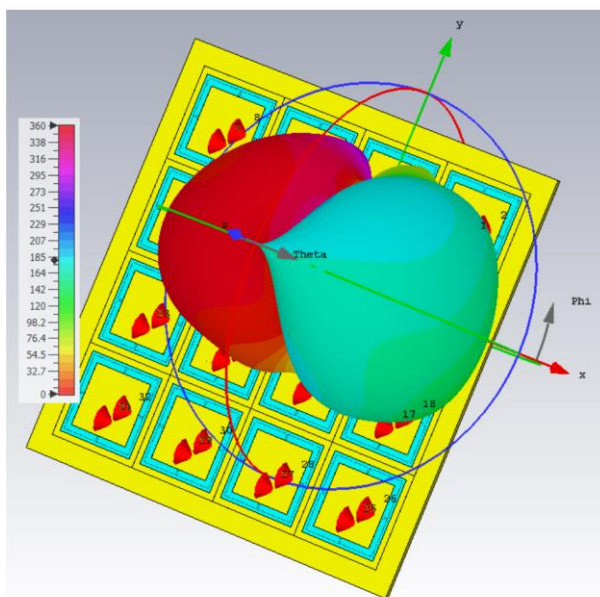
Naziv	Protokol	Max. TX snaga	Max. CPU brzina	Flash memorija (kB)	RAM (kB)	GPIO	Radna temperatura
EFR32BG2 2C224F512I M40-C	BLE 5.2, Direction finding	6 dBm	76,8 MHz	512	32	26	-40 do 125 °C

Mikrokontroler s URA pločom komunicira putem *Simplicity* + kabela povezanog preko *debug* adaptera, kako bi se omogućilo programiranje EFR32-BG22 SoC koji se nalazi na URA (slika 45.).

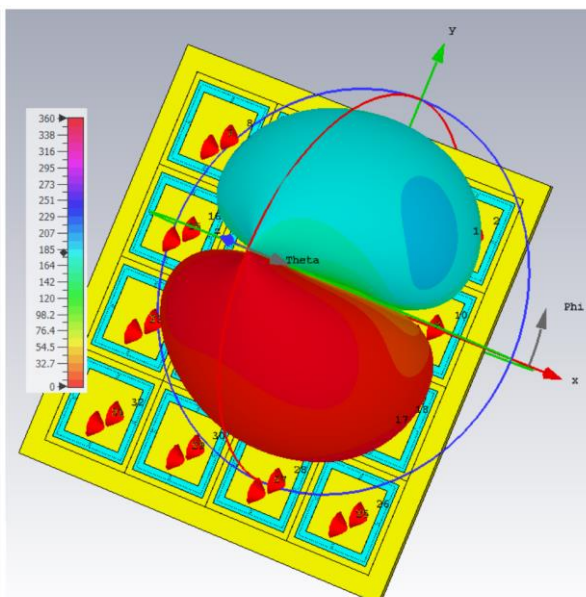


Slika 45. Shema komunikacije mikrokontrolera i URA [55]

BRD4191A je specijalno dizajniran URA s primjenom isključivo za AoA ili AoD DF. 2D polje antena sposobno je pronaći i kut azimuta i kut elevacije, kako je već prikazano na slici 35. URA je veličine 16x16 cm, a sastoji se od šest različitih PCB slojeva. Na slikama 46.a i 46.b prikazani su dijagrami zračenja u smjeru  $\varphi$  i  $\theta$  polarizacije.



Slika 46.a Dijagram zračenja,  $\varphi$  smjer [56]



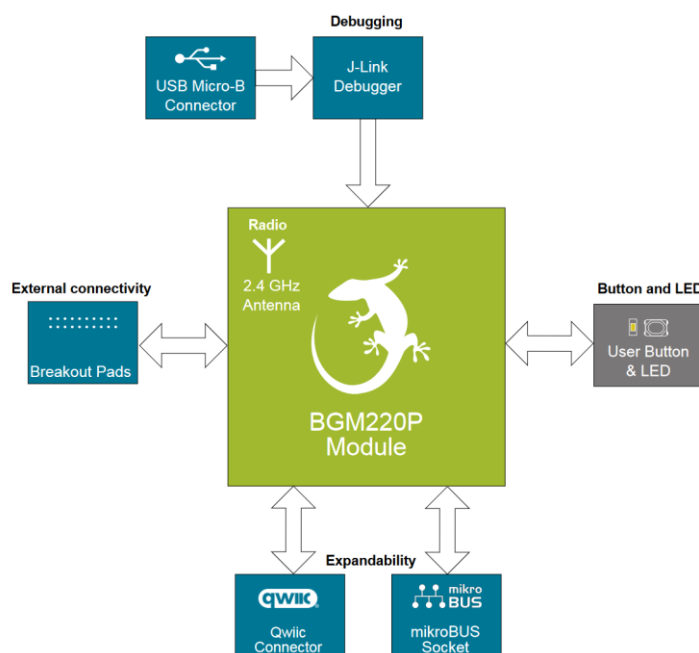
Slika 46.b Dijagram zračenja,  $\theta$  smjer [56]

## 5.2. Odašiljač

Odašiljač u osnovi može biti bilo koji BLE 5.1+ uređaj koji ima mogućnost odašiljanja CTE. Iz praktičnih razloga, odlučeno je da odašiljač također bude proizvod tvrtke *SiliconLabs*. *SiliconLabs* nudi EFR32BG22 *Thunderboard* komplet [57], koji se obično koristi za DOA testiranje. EFR32BG22 *Thunderboard* komplet na sebi sadrži utor za gumb-bateriju CR2032 preko koje se napaja, pa žičana veza s računalom za napajanje putem USB-C nije potrebna za vrijeme testiranja. EFR32BG22 *Thunderboard* košta 43 €, što je poprilično mnogo s obzirom da je za testiranje potrebno nekoliko odašiljača.

Iz tog razloga odlučena je kupovina BGM220 *Bluetooth Module Explorer* kompleta [58] koji košta 18 €. BGM220 *Bluetooth Module* i EFR32BG22 *Thunderboard* hardverski su slični, jer oboje sadrže isti ARM Cortex-M33 procesor. Osim utora za bateriju, EFR32BG22 *Thunderboard* sadrži i senzore za vlagu i temperaturu, međutim, to nije važno za zadanu primjenu.

Blok-dijagram BGM220 prikazan je na slici 47.



Slika 47. Blok-dijagram BGM220 [59]

Zbog nedostatka utora za gumb-bateriju, BGM220 napaja se i *flasha* preko USB-C kabela povezanog s računalom. Iz potrebe testiranja na daljinu, odašiljači za vrijeme testiranja neće moći biti povezani s računalom. BGM220 sadrži i *header pin-ove* od 3,3 V i 5 V za napajanje vanjskih uređaja (kad je pločica povezana s računalom) ili za napajanje pločice (u slučaju da nije povezana s računalom). Na slici 48. prikazan je BGM220 koji se napaja putem dvije AA baterije preko *header pinova*. Takav postav koristit će se u testiranju.

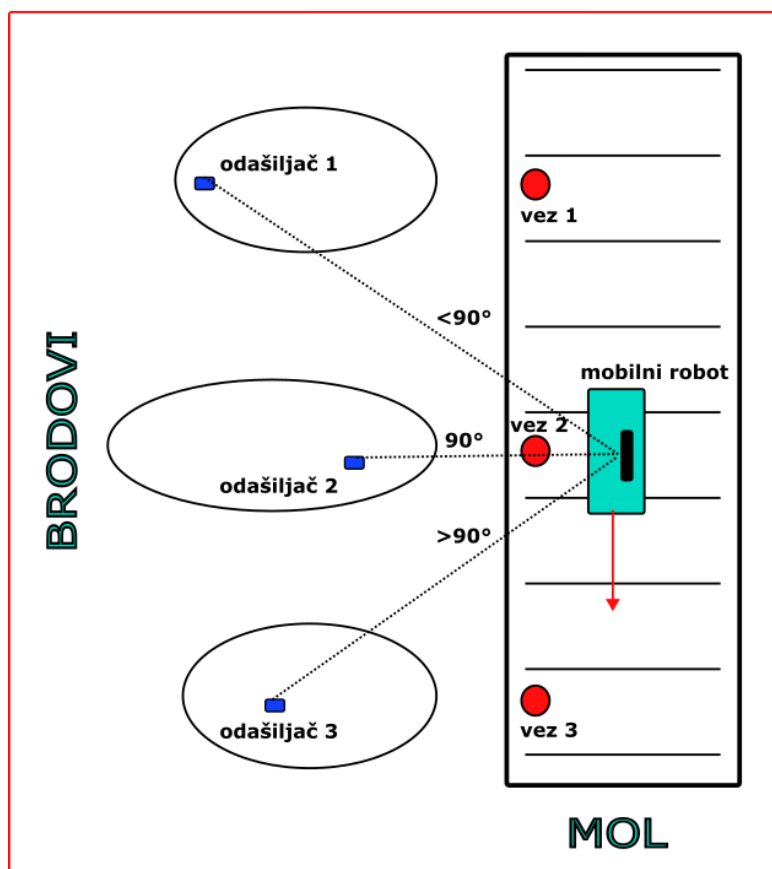


Slika 48. BGM220 napajan pomoću 2x AA baterije

## 6. IMPLEMENTACIJA ROBOTSKOG SUSTAVA ZA IDENTIFIKACIJU I LOKALIZACIJU BRODOVA

Marina je ljeti dinamično okruženje s velikim brojem brodova u odlasku i dolasku. Neki brodovi u marini su stalni gosti i imaju predodređeni cjelogodišnji vez, dok su drugi privremeni gosti na svega nekoliko dana. U slučaju da brod koji je stalni gost isplovi, a u međuvremenu privremeni gost uplovi u marinu i zauzme njegov vez, tu informaciju bi radnici marine trebali što brže saznati kako ne bi došlo do komplikacija.

Obično ovaj posao detekcije brodova koji nisu na svojim vezovima obavljaju radnici marine, obilaskom molova. Ideja ove implementacije je da mobilni robot zamijeni radnike marine u obavljanju ovog zadatka. Mobilni robot patrolirao bi marinom s BLE AoA prijamnikom, a svaki brod imao bi BLE odašiljač. Precizna lokacija mobilnog robota poznata je u svakom trenutku jer na sebi sadrži GPS, tako da je poznata informacija kod kojeg se veza robot trenutno nalazi. Ako s brodova robot dobiva ID odašiljača i kut dolaska, a kreće se uzdužno po molovima, dok je robot pozicioniran kod određenog veza u marini i dobiva kut dolaska signala od  $90^\circ$ , moguće je pretpostaviti da ID odašiljača pripada upravo tom vezu kod kojeg je robot pozicioniran (slika 49.). Identifikacija brodova vršit će se na temelju ove pretpostavke.

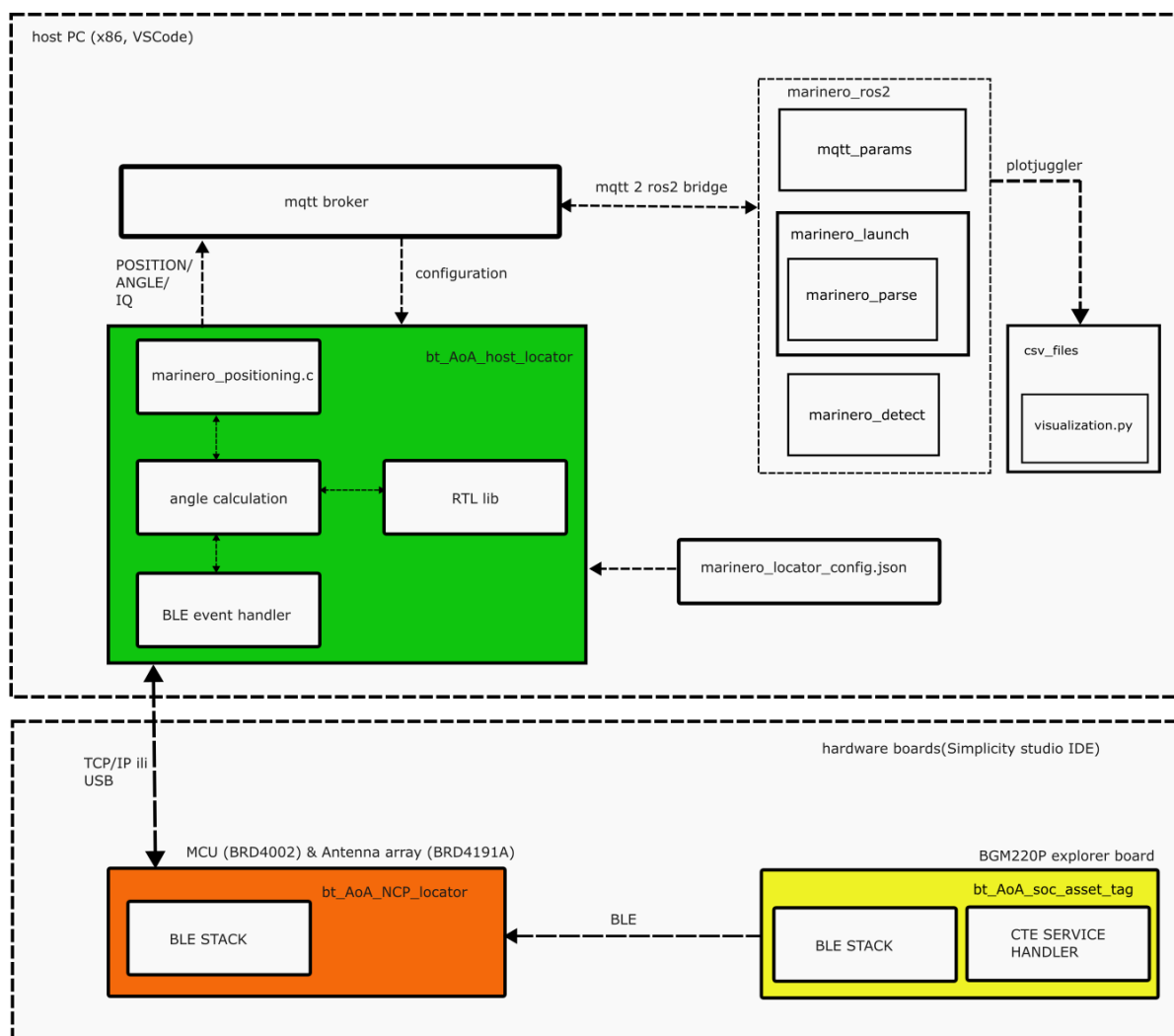


Slika 49. Prikaz identifikacije brodova



Osim identifikacije pomoću kuta dolaska, kod rubnih slučajeva (npr. skretanje mobilnog robota na kraju mola) gruba lokalizacija brodova služila bi kao verifikacija identifikacije. Grubu lokalizaciju moguće je ostvariti kombiniranjem kuta dolaska s metodama pronalaženja udaljenosti (*engl. range finding*).

Struktura implementacije softvera prikazana je na slici 50. Struktura je podijeljena na dio koji se izvršava na pločicama BGM220 i BRD4191A te na dio koji se izvršava na uređaju poslužitelju (PC ili neki drugi x86 procesor).

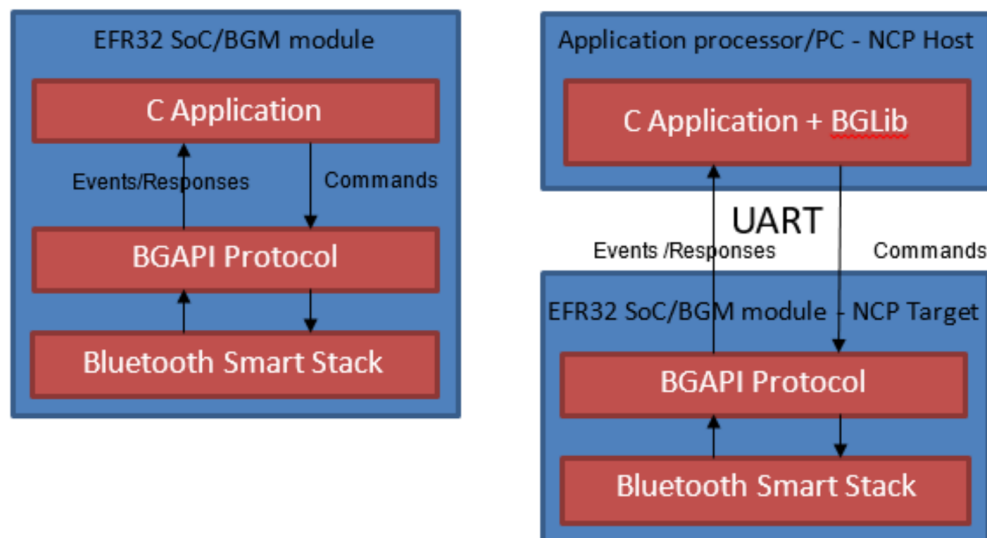


Slika 50. Prikaz blok-dijagrama softvera

## 6.1. Ko-procesorski način rada

Cijeli softver osmišljen je da radi u tzv. ko-procesorskom načinu rada (*engl. NCP – Network Co-Processor*). Takvim radom rasterećuje se relativno slab BG22 mikročip koji se nalazi na BRD4191A. Ideja NCP rada je da se većina teških kalkucija odvija na NCP poslužitelju, kao što je npr. izračun kuta, pozicije i razni filteri, a BG22 upravlja isključivo nižim dijelovima BT

stoga. Za razliku od NCP načina rada, u SoC načinu rada BG22 mikročip je zaslužan za izvršavanje cijelog koda primjene. Slika 51. prikazuje razliku između SoC i NCP načina rada.



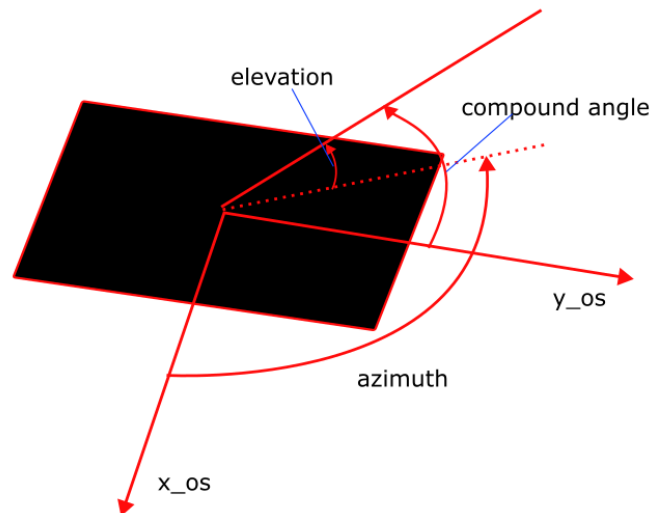
Slika 51. NCP vs SoC način rada [60]

## 6.2. Identifikacija odašiljača u Robotskom operacijskom sustavu 2 - ROS2

Robotski operacijski sustav 2 (ROS2 – *engl. Robot Operating System 2*) je *framework* za pisanje koda za upravljanje robotima. Sastoji se od čvorova (*engl. nodes*) koji međusobno komuniciraju porukama, na način da ih objavljuju (*engl. publish*) ili da se na njih pretplaćuju (*engl. subscribe*). Jedan od zadataka bila je integracija AoA senzora u robotski sustav. Originalno, poruke kuta koje računa algoritam se objavljuju na temu (*engl. topic*) na MQTT server. Međutim, robot ne može čitati poruke u tom obliku, nego se one najprije trebaju prebaciti u ROS2. To prebacivanje moguće je uz *ros2mqtt bridge* [61].

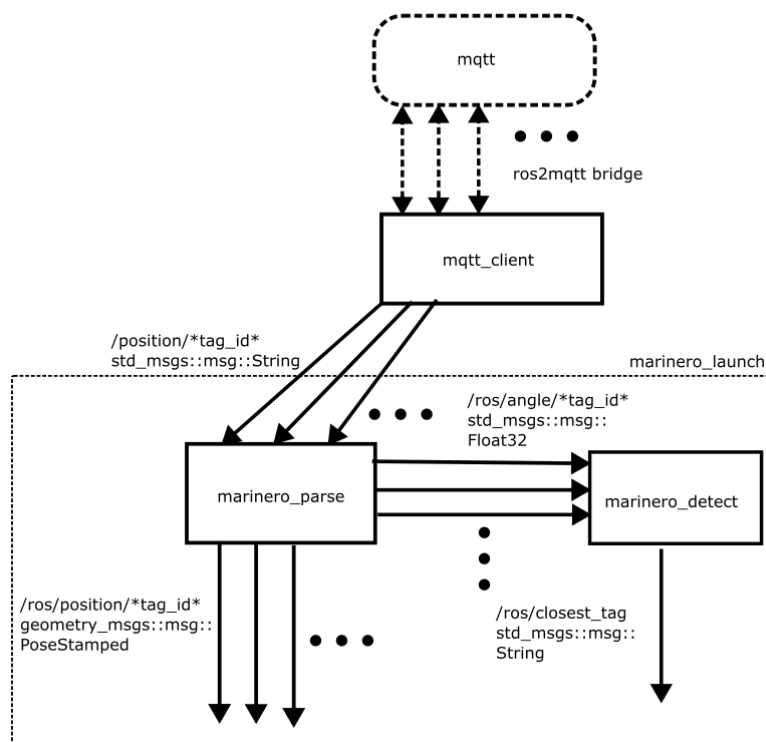
Nakon prebacivanja u ROS2, te poruke se parsiraju pomoću ROS2 čvora *marinero\_parse* u standardnu ROS2 poruku *PoseStamped*. *PoseStamped* je poruka koja javlja poziciju odašiljača, dakle njegove x, y i z koordinate u prostoru. Osim pozicije, *PoseStamped* poruka u svojem zaglavlju sadrži i podatke o koordinatnom sustavu u kojem se nalazi ta pozicija (u ovom slučaju, u koordinatnom sustavu senzora) te vremensku oznaku (*engl. timestamp*) kada je poruka primljena. Kasnije se ta poruka matricama transformacije može transformirati u koordinatni sustav robota, pa u koordinatni sustav svijeta (*engl. world frame*).

*Marinero\_detect* čvor javlja trenutnu estimaciju najbližeg odašiljača (ili broda), prema slici 49. On uzima sve trenutno objavljene složene kutove (*engl. compound angle*) različitih tagova i objavljuje onaj *tag\_id* čiji je složeni kut najbliži 90°.



**Slika 52. Definicija složenog kuta**

Na slici 52. prikazan je način na koji je definiran složeni kut, pomoću kuta azimuta i kuta elevacije. Na slici 53. prikazana je cijela struktura napravljene implementacije u ROS2. Robot se može služiti krajnjim *PoseStamped* porukama pozicije odašiljača i *String* porukama trenutno detektiranog odašiljača (tj. broda). Paket *marinero\_launch* ne sadrži u sebi čvorove, već *launchfile* koji istovremeno pokreće oba čvora (*marinero\_parse* i *marinero\_detect*).

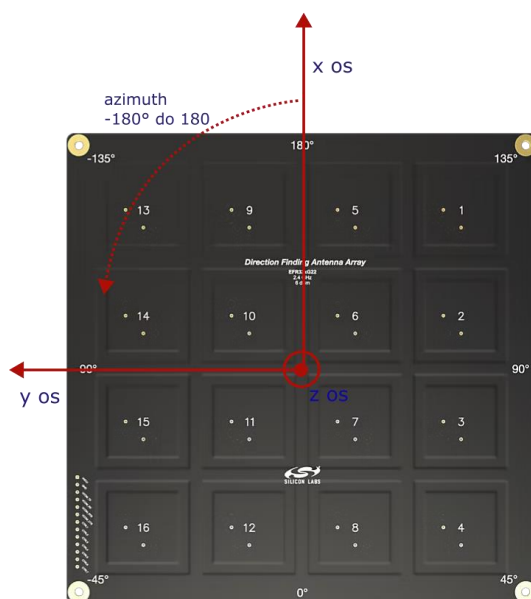


**Slika 53. Struktura ROS2 implementacije sustava**

### 6.3. Izračun pozicije

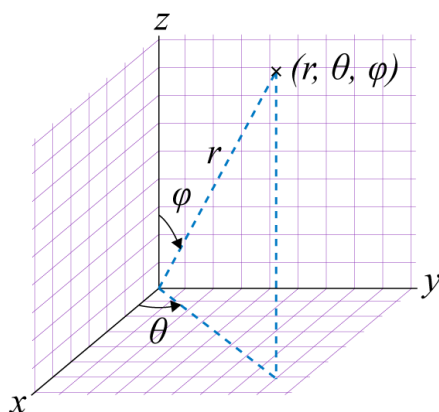
U ovoj implementaciji pozicija odašiljača u prostoru računa se kombinacijom kuta dolaska i udaljenosti odašiljača od senzora. Udaljenost odašiljača od senzora dobiva se pomoću RSSI. RSSI je poprilično neprecizan indikator udaljenosti odašiljača, ali bi u LoS situacijama lokalizacija trebala ostvariti dovoljno dobru točnost.

Koordinatni sustav BRD4191A niza antena definiran je na način da z os izlazi iz pločice, a x-os gleda u smjeru  $180^\circ$  (tj.  $-180^\circ$ ) kuta azimuta (slika 54.). Kut elevacije (definiran slikom 52.) kreće se u rasponu od  $0$  do  $90^\circ$ , a kut azimuta u rasponu od  $-180^\circ$  do  $180^\circ$ .



Slika 54. Definicija koordinatnog sustava BRD4191A

Algoritam izračuna pozicije uzima izračunatu udaljenost pomoću RSSI modela logaritamske udaljenosti [62] i izmjerene kutove dolaska, azimut i elevaciju. Kutovi se računaju pomoću RTL biblioteke (*engl. Real Time Location Library*) pa se zatim pozicija može jednostavno odrediti pretvorbom sfernih koordinata (slika 55.) u kartezijske.



Slika 55. Standardna definicija sfernog koordinatnog sustava [63]

Spomenuti RSSI model logaritamske udaljenosti je:

$$P_R(\text{dBm}) = A - 10 \eta \log_{10} r \quad (6.1)$$

Gdje je parametar  $A$  izmjerena primljena snaga u dBm na nekoj referentnoj udaljenosti, a parametar  $\eta$  je faktor transmisije čija vrijednost ovisi o okolini u kojoj se vrši propagacija signala.

U nastavku je prikazan programskog koda u C jeziku koji vrši izračun pozicija, a nalazi se u *marinero\_positioning.c* datoteci. Cijeli kod dostupan je na *GitHub* repozitoriju [64].

```

93 //Spherical coordinates
94 phi = 90 - (angle->elevation);
95 theta = 180 + (angle->azimuth);
96 rho = (angle->distance);
97
98 //Position calculate
99 x = rho*sin(phi * M_PI / 180.0) * cos(theta * M_PI / 180.0);
100 y = rho*sin(phi * M_PI / 180.0) * sin(theta * M_PI / 180.0);
101 z = rho*cos(phi * M_PI / 180.0);
102
103 //Compound angle calculate
104 compound = acos(sin(theta * M_PI / 180.0) * sin(phi * M_PI /
180.0)) * (180.0 / M_PI);
105
106 //Assign values
107 position->x = x;
108 position->y = y;
109 position->z = z;
110 position->compound = compound;

```

U standardnom sfernom koordinatnom sustavu kut azimuta je u rasponu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , a kut elevacije od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , ali je definiran između z-osi i radijalne linije (*engl. radial line*). Zbog toga, u linijama 94 i 95 vrši se pretvorba sfernih koordinata, dobivenih u sfernom koordinatnom sustavu pločice, u standardni sferni koordinatni sustav. Potom se u linijama 99 do 101 računaju kartezijske koordinate pomoću 6.2, 6.3, 6.4.

$$x = r \sin(\varphi) \cos(\theta) \quad (6.2)$$

$$y = r \sin(\varphi) \sin(\theta) \quad (6.3)$$

$$z = r \cos(\theta) \quad (6.4)$$

Složeni kut definiran ranije na slici 52. računa se u liniji 104 pomoću izraza 6.5, a zatim se u linijama 107 do 110 u definiranu C strukturu (*engl. struct*) nazvanu *position* upisuju izračunate vrijednosti.

$$\delta = \arccos(\sin(\theta) \sin(\varphi))r \quad (6.5)$$

#### 6.4. Filter indikatora jačine dobivenog signala - RSSI

Kako bi se poboljšao izračun udaljenosti pomoću indikatora jačine dobivenog signala (RSSI), u implementaciji su korištena dva filtera.

Prvi je MRC filter (*engl. Maximum Ratio Combiner*). MRC pridodaje težinske faktore svakoj RSSI vrijednosti ovisno o kvaliteti signala. Na taj način, RSSI s većom vrijednosti dobiti će veći težinski faktor. Težinski prosjek računa se prema (6.6) [65].

$$MRC = \sum_{i=1}^N \left( \frac{RSSI_i - RSSI_{min}}{\sum_{j=1}^N (RSSI_j - RSSI_{min})} \right) RSSI_i \quad (6.6)$$

U implementaciji, RSSI vrijednosti se računaju iz IQ podataka dobivenih na 32 antene (16 dvostruko polariziranih) pomoću 6.7. Nakon toga, dobivene RSSI vrijednosti na svim antenama se sortiraju kako bi se pronašao minimum te se zatim računa težinski prosjek.

$$RSSI_i = I^2 + Q^2 \quad (6.7)$$

Drugi filter je jednostavan filter praga (*engl. threshold filter*). Ideja tog filtera je da makne iznimne vrijednosti (*engl. outliers*) RSSI iz pouzdanih podataka [66]. Programski kod implementacije ovog filtera prikazan je u nastavku.

```

75 //RSSI threshold filtering
76 static int C_threshold = 5;
77 static int RSSI_avg_threshold_diff = 5;
78 static int RSSI_threshold_diff = 8;
79 static double last_valid_rssi = 0.0;
80 static int count = 0;
81
82 if (fabs(average_rssi_weighted - rssi_preamble) <
RSSI_threshold_diff) {
83     // Add new RSSI to packet
84     if (fabs(average_rssi_weighted - last_valid_rssi)
< RSSI_avg_threshold_diff || count > C_threshold) {
85         count = 0;
86         iq_report->avg_rssi = average_rssi_weighted;
87         last_valid_rssi = average_rssi_weighted;
88     } else {
89         // Skip irregular measurement
90         count++;
91         iq_report->avg_rssi = last_valid_rssi;
92     }
93 } else {
94     // Discard outlier measurement
95     iq_report->avg_rssi = last_valid_rssi;
96 }

```

U kodu su izvršene dvije provjere za neregularna mjerenja RSSI. Svaki dobiveni set IQ podataka sadrži RSSI izmjeren pomoću preambule paketa, pomoću koje se vrši AGC. Prva provjera, na liniji 82, uspoređuje tu vrijednost s izračunatim težinskim prosjekom. Ako je

razlika između te dvije vrijednosti veća od varijable *RSSI\_threshold\_diff*, mjerenje se odbacuje kao neispravno. Druga provjera vrši se između posljednjeg valjanog izračunatog težinskog prosjeka i sadašnjeg izračunatog težinskog prosjeka. Ako je razlika između te dvije vrijednosti veća od varijable *RSSI\_avg\_threshold\_diff*, mjerenje se odbacuje i brojaču u varijabli *count* se pridodaje jedan. Nakon nekoliko ovakvih uzastopnih odbacivanja podataka, definiranih u varijabli *C\_threshold*, filter prihvaća promjenu vrijednosti kao promjenu sustava, a ne kao nasumična neregularna mjerenja. Bitno je primijetiti da će sustav biti tromiji na promjene s većom vrijednosti varijable *C\_threshold*.

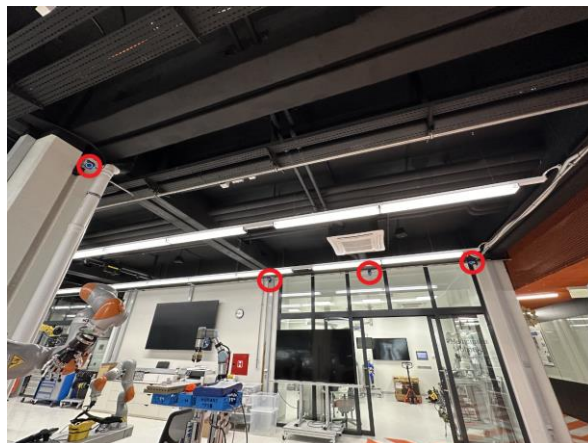
## 7. TESTNI POSTAV

Ideje testiranja su validacija ispravnih mjerenja kutova dolaska senzora, testiranje identifikacije odašiljača pomoću tog senzora i provjera preciznosti lokalizacije. Testovi su izvršeni u laboratoriju CRTA, koristeći se *OptiTrack*-om i ASTRO robotom.

*OptiTrack* je sustav za preciznu lokalizaciju pomoću infracrvenih kamera. *OptiTrack* obično služi za praćenje pokreta. Sustav pomoću nekoliko kamera snima reflektivne markere te pomoću triangulacije računa njihovu lokaciju u snimanom prostoru. Sustav može postići preciznost i do ispod 1 mm, pod uvjetom da se prethodno kalibrira. *OptiTrack* će u testovima služiti za mjerenje referentnih točaka i kutova, koje će se zatim uspoređivati sa radom senzora. *Optitrack* sustav u CRTA-i sastoji se od osam kamera raspoređenih po prostoru, prikazanih na slikama 56.a. i 56.b i označenih crvenim krugovima.



Slika 56.a Kamere *Optitrack*-a u CRTA-i, 1. pogled [67]



Slika 56.b Kamere *Optitrack*-a u CRTA-i, 2. pogled [67]

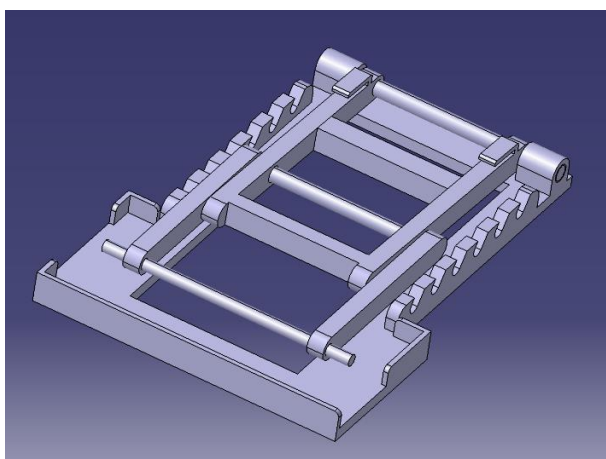
ASTRO robot (slika 57.) je jednostavni diferencijalni robot osmišljen i napravljen u CRTA-i. Robotom se upravlja pomoću *joystick*-a, a u sebi sadrži *Nvidia Jetson* računalo, Robot će u testu detekcije služiti kao mobilna platforma na kojoj se nalazi senzor.



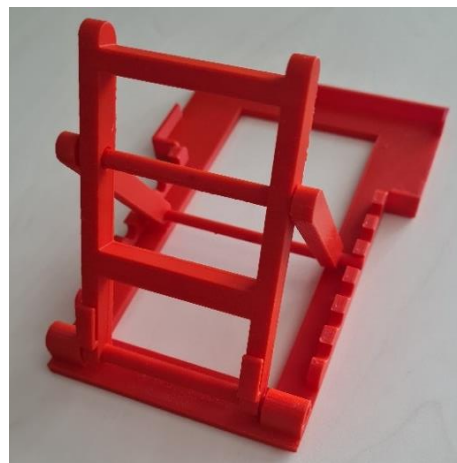


Slika 57. ASTRO robot s montiranim senzorom i Optitrack markerima

Za montažu senzora na robot konstruiran je stalak u CAD programu *Catia V5* (slika 58.a). Stalac je isprintan na 3D printeru *Prusa MK3* koristeći PLA materijal (slika 58.b).



Slika 58.a CAD model stalaka za senzor

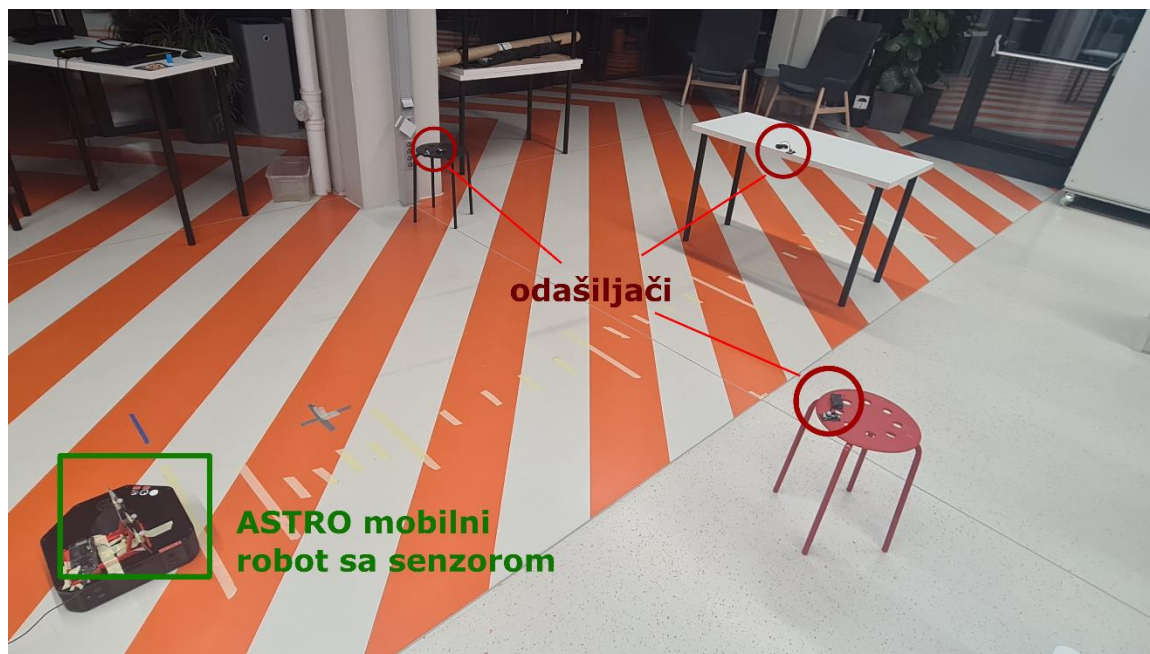


Slika 58.b 3D isprintani stalak za senzor

Izvršen je test mjerenja kuta dolaska (AoA), test mjerenja RSSI na različitim udaljenostima, test detekcije BLE odašiljača (slika 59.) i test lokalizacije pomoću algoritma pozicioniranja (slika 60.). Na slikama, odašiljači su označeni crvenim krugovima, a prijammnik zelenim kvadratom.



Slika 59. Test detekcije i identifikacije odašiljača

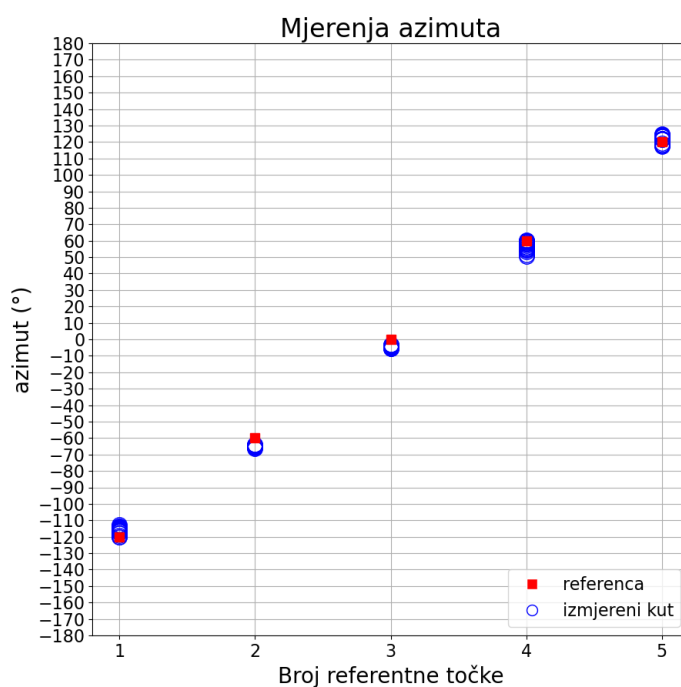


Slika 60. Test lokalizacije odašiljača

## 8. REZULTATI

### 8.1. Mjerenje kuta dolaska

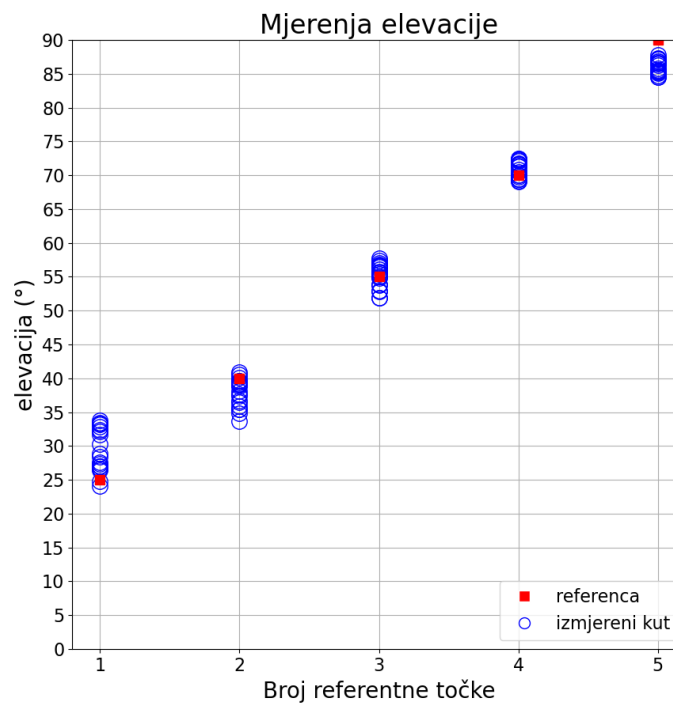
U testu mjerenja kuta dolaska na odašiljač je postavljen marker te je potom odašiljač pozicioniran na pet referentnih točaka. Kutovi elevacije i azimuta izmjereni su pomoću algoritma i uspoređeni sa stvarnim kutem izmjerenim pomoću *OptiTrack*-a. Referentni kutovi azimuta postavljeni su na  $-120^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $120^\circ$ , a referentni kutovi elevacije postavljeni su na  $25^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $70^\circ$  i  $90^\circ$ . Udaljenost odašiljača od prijamnika u svakoj referentnoj točki iznosila je 1,5 m.



**Slika 61. Rezultati mjerenja kuta dolaska - azimut**

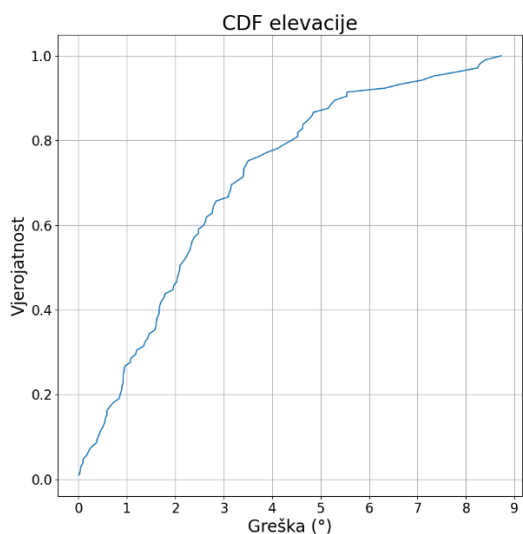
Na slici 61. prikazan je graf rezultata mjerenja azimuta kuta dolaska. Crvene točke predstavljaju referentnu vrijednost azimuta u svakoj od pet referentnih točaka, a plavi krugovi predstavljaju vrijednosti azimuta izmjerenih algoritmom. U svakoj referentnoj točki izmjereno je 20 vrijednosti azimuta.

Na grafu se kod točaka 2 i 3 može primijetiti visoka preciznost mjerenja s minimalnim rasipanjem, ali smanjena točnost zbog pomaka u negativnom smjeru y osi. Pogreška u točkama 2 i 3 vjerojatno je uzrokovana zbog interferencije signala.

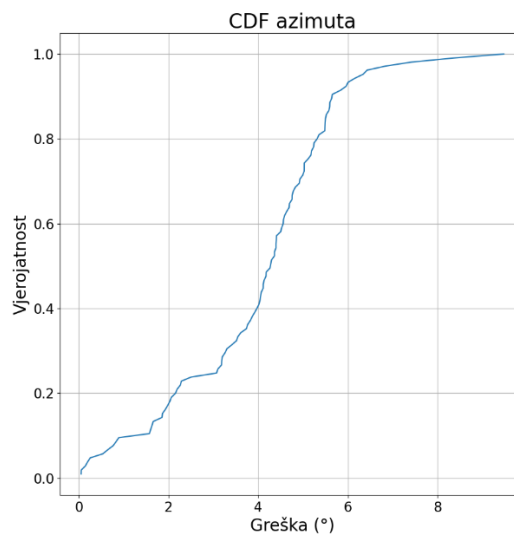


**Slika 62. Rezultati mjerenja kuta dolaska – elevacija**

Na grafu rezultata mjerenja elevacije kuta dolaska (slika 62.) također se može vidjeti pogreška mjerenja u točkama 1, 2 i 5. Najveća pogreška javlja se u točki 1 gdje iznosi skoro 10 stupnjeva. Senzori mjerenja kuta dolaska obično su neprecizni kod jako malih kuteva i jako velikih kuteva. Kod manjih kuteva zbog nelinearnosti funkcije  $\arccos$  u osnovnom izrazu za računanje kuta dolaska (4.3), može se očekivati veća pogreška. Kod većih kuteva, razlika u fazi signala između antena se smanjuje što uzrokuje faznu dvoznačnost te je zbog toga teže precizno odrediti točan kut dolaska.



**Slika 63.a CDF graf rezultata mjerenja azimuta**

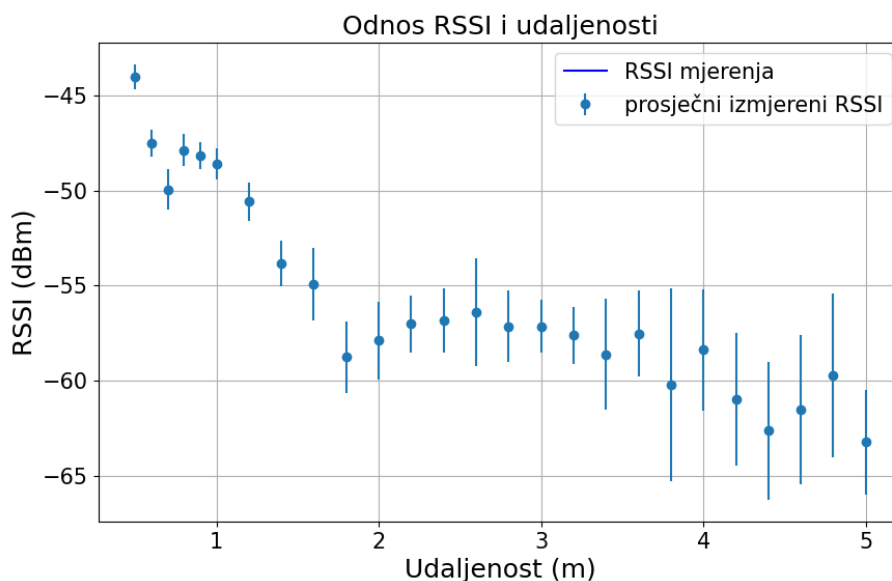


**Slika 63.b CDF graf rezultata mjerenja elevacije**

Na slikama 63.a i 63.b prikazane su funkcije kumulativne distribucije (CDF – *engl. Cumulative Distribution Function*) mjerenja azimuta i elevacije. Funkcija kumulativne distribucije pokazuje vjerojatnost da određena varijabla (u ovom slučaju mjerenje) poprimi neku vrijednost. Kod rezultata mjerenja azimuta više od 90% mjerenja imalo je grešku manju od 6°, dok je kod rezultata mjerenja elevacije više od 90% mjerenja imalo grešku manju od 5,5°. Ovi rezultati mjerenja kuta su zadovoljavajući za zadanu primjenu.

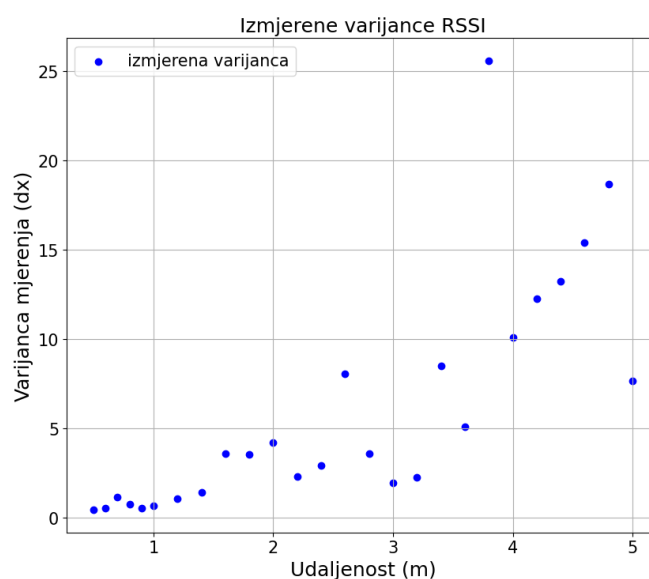
## 8.2. Mjerenje udaljenosti pomoću indikatora jačine dobivenog signala

U testu mjerenja RSSI, markeri su postavljeni na prijamnik i odašiljač te je određeno 26 referentnih udaljenosti. Te su udaljenosti redom: 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m, itd. do 1 m, a zatim 1,2 m, 1,4 m, 1,6 m itd. do 5 m. Potom je izmjeren RSSI u svakoj referentnoj točki.



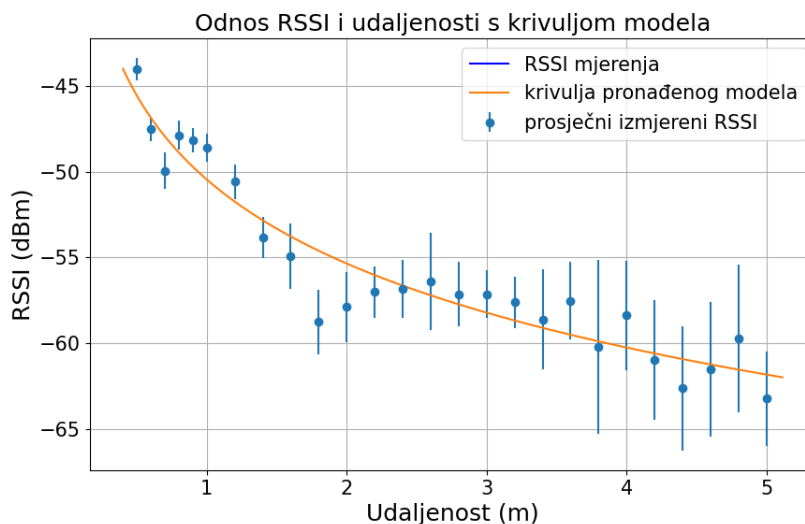
**Slika 64. Rezultati mjerenja RSSI**

Na slici 64. prikazan je graf izmjerenih RSSI vrijednosti izraženih u dBm na različitim udaljenostima. Plavim horizontalnim linijama prikazan je raspon mjerenja, a točkama je prikazana njihova srednja vrijednost. Može se primijetiti znatno rasipanje RSSI mjerenja koje raste s povećanjem udaljenosti. Trend rasta jasnije je prikazan na slici 65. koja prikazuje varijancu mjerenja u odnosu na udaljenost. Ova relacija varijanci mjerenja i udaljenosti ima smisla, jer pri rastu udaljenosti prijamnika i odašiljača, odašiljani signal slabi i skloniji je interferenciji drugih signala. Također, s većom udaljenošću izraženija je refleksija signala (*multipath*) od objekata koji se nalaze između prijamnika i odašiljača.



**Slika 65. Varijanca mjerenja naspram udaljenosti**

Za pronalazak koeficijenata  $A$  i  $\eta$  modela prikazanog u (6.1) korištena su dobivena mjerenja. Za što bolji opis relacije vrijednosti RSSI i udaljenosti, potrebno je prilagoditi spomenute koeficijente okolini u kojoj se mjerenje izvršilo. Pomoću *scipy* [68] funkcije *curve\_fit* modula *scipy.optimize*, matematički model se prilagodio izmjerenim podacima. Na slici 66. prikazana je krivulja modela, a pronađeni koeficijenti su  $A = -50,61$  i  $\eta = 1,63$ .



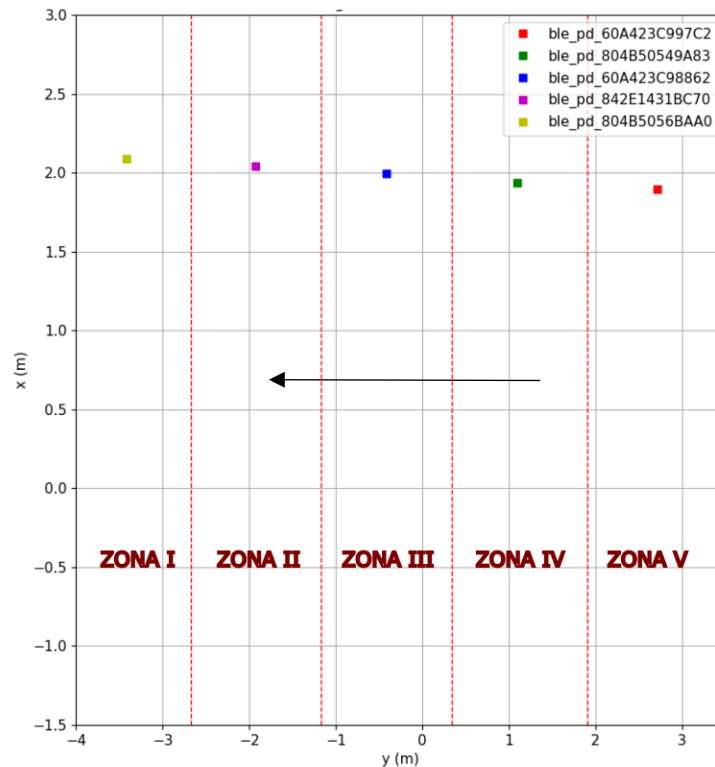
**Slika 66. Krivulja matematičkog modela relacije udaljenosti i RSSI vrijednosti pronađena pomoću *scipy.optimize.curve\_fit***

Može se zaključiti da pronađena krivulja ne odgovara svim izmjerenim točkama. Najveće odstupanje modela od krivulje može se primijetiti oko udaljenosti od 2 m. Također, zbog velike varijance kod većih udaljenosti može se pretpostaviti da će udaljenija mjerenja imati veću grešku u lokalizaciji.

### 8.3. Mjerenje točnosti identifikacije odašiljača

U testu detekcije i identifikacije odašiljača, pet odašiljača postavljeni su u ravnu liniju međusobno udaljeni 1,5 m (slika 59.). Na sve odašiljače postavljeni su markeri kako bi se pomoću *OptiTrack*-a dobila njihova referentna lokacija u prostoru. Zatim se ASTRO mobilni robot koji je na sebi imao montiran senzor kuta dolaska i markere (za lokalizaciju) kretao paralelno s tom linijom, u negativnom smjeru y-osi (slika 67., prikazano crnom strelicom). Prema ideji prikazanoj na slici 49., ROS2 čvor *marinero\_detect* javljao je ID odašiljača kojeg je algoritam estimirao da se u zadanom trenutku nalazi okomito na senzor. Testovi su napravljeni za BT povezani (*engl. connection*) način rada, BT nepovezani (*engl. connection-less*) način rada (primarno oglašavanje) i BT način rada sekundarnog, tj. periodičkog oglašavanja.

Pod pretpostavkom da su odašiljači postavljeni u sličnu konfiguraciju kao na slici 49., tj. da im udaljenost po y-osi iznosi otprilike 1,5 m, a ASTRO robot se kreće ravnom linijom paralelno odašiljačima, za određivanje točnosti identifikacije odašiljača trajektorija će se podijeliti na pet zona prikazanih na slici 67.

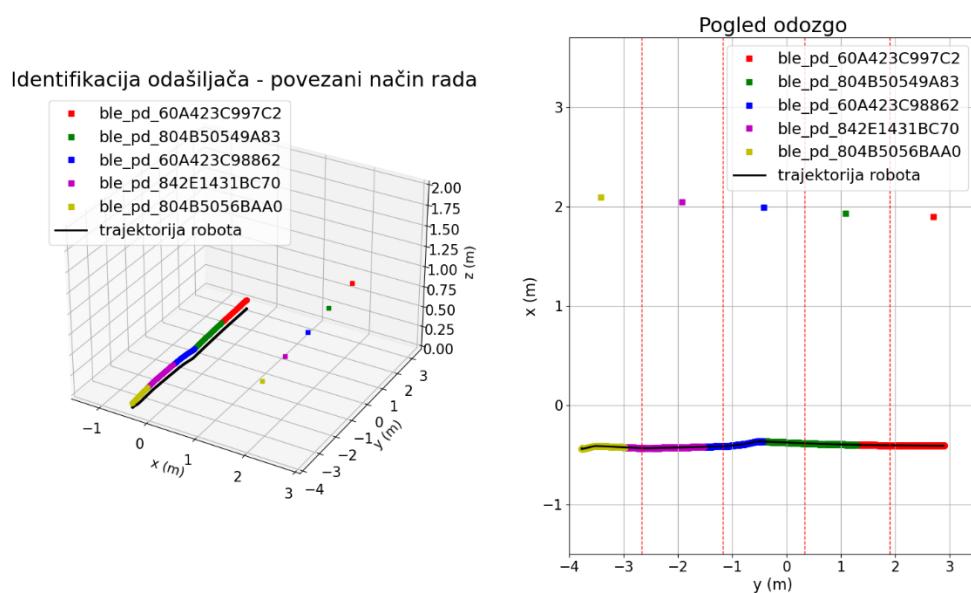


**Slika 67. Zone u testu identifikacije**

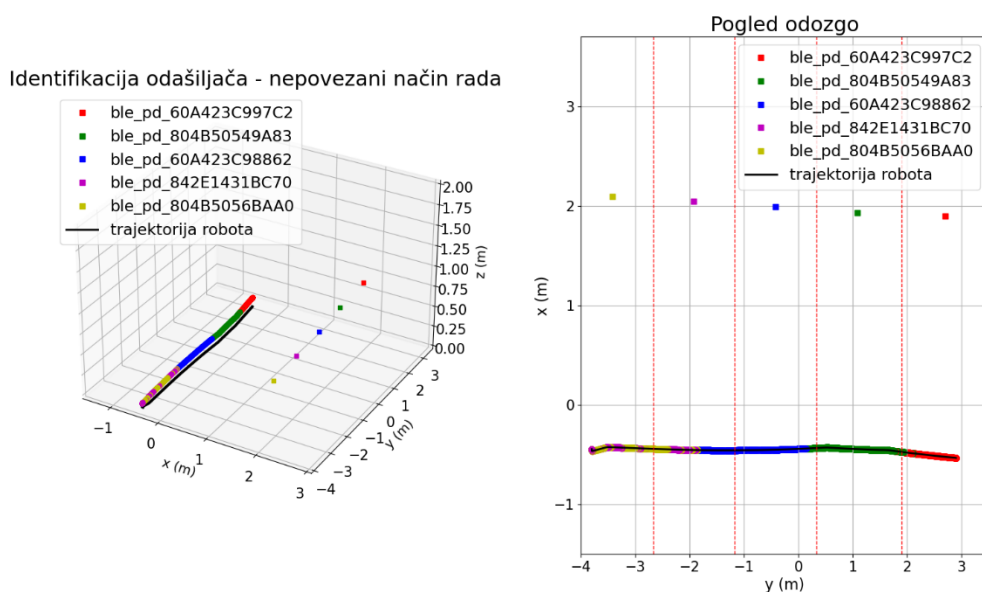
Na ovaj način je odašiljaču s ID ble\_pd\_804B5056BAA0 dodijeljena zona I., odašiljaču ble\_pd\_842E1431BC70 zona II., ble\_pd\_60A423C98862 zona III., itd. Svako točno javljanje ID odašiljača kada se ASTRO robot nalazi u odgovarajućoj zoni tog odašiljača broji se pod točnu identifikaciju.

Na slikama 68. do 70. prikazani su rezultati testova identifikacije odašiljača. Različitim bojama (crvena, zelena, plava, magenta i žuta) prikazane su stvarne pozicije odašiljača u prostoru. Crna linija prikazuje trajektoriju ASTRO mobilnog robota. Ta trajektorija je također obojena u različite boje koje odgovaraju odašiljaču za kojeg je *marinero\_detect* na trenutnoj poziciji javljao da se nalazi okomito na senzor. Dakle, obojena trajektorija pokazuje na kojoj poziciji je algoritam detektirao koji odašiljač.

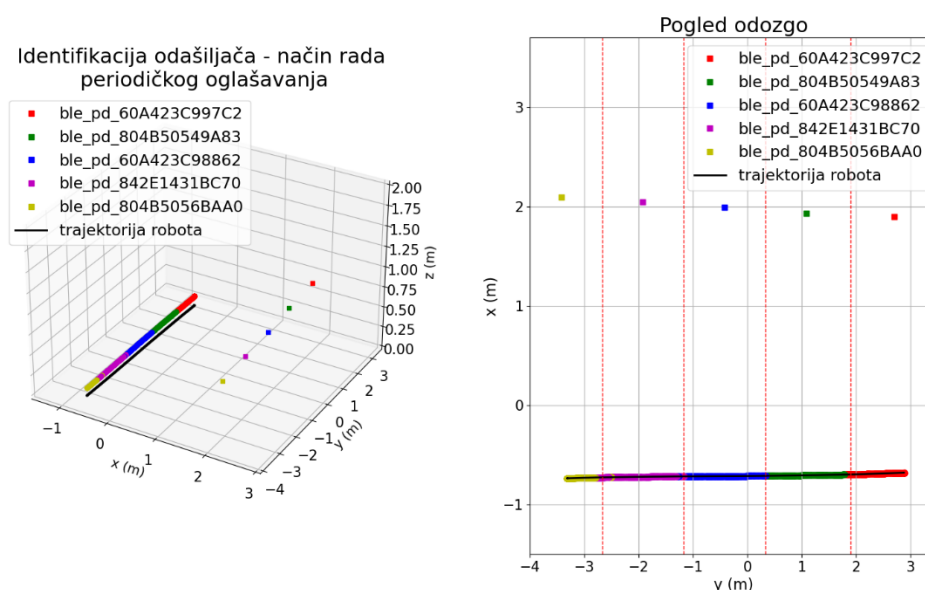




Slika 68. Test identifikacije, povezani način rada



Slika 69. Test identifikacije, nepovezani način rada



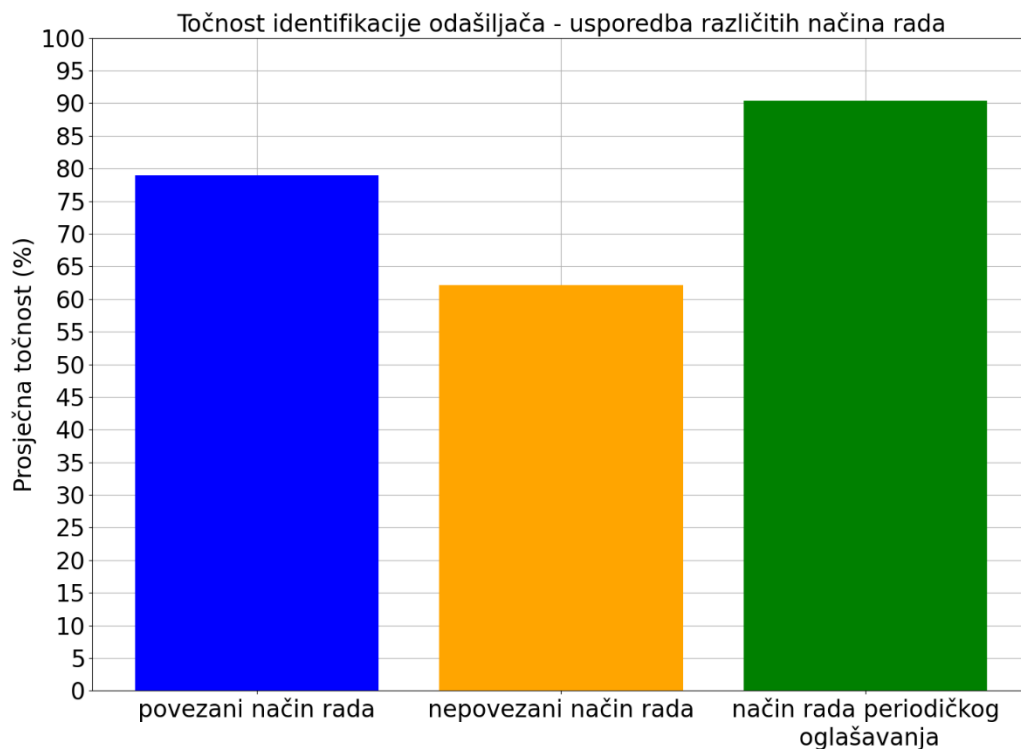
**Slika 70. Test identifikacije, način rada periodičkog oglašavanja**

Kod prikazanog testa u povezanom načinu rada algoritam je postigao točnost od 75,19%. U povezanom načinu, u signalu se eliminiraju interferencije i greške pomoću CRC mehanizma spomenutog u poglavlju 3.1. i zbog toga je vrlo robusan. S druge strane, paketi u povezanom načinu šalju se najsporije te se zato događa kašnjenje u detekciji zbog slabe stope osvježavanja (*engl. refresh rate*). To je moguće vidjeti na grafu prikazanom na slici 68. gdje pri ulasku u zonu drugog odašiljača algoritam još neko vrijeme nastavlja javljati ID odašiljača prethodne zone.

Kod prikazanog testa u nepovezanom načinu algoritam je postigao točnost od 69,25%. U nepovezanom načinu rada svi odašiljači šalju pakete istovremeno bez redoslijeda pomoću primarnog (*legacy*) oglašavanja koje se odvija samo putem BT kanala 37, 38 i 39. Nepovezani način je zbog toga podložan interferencijama jer se BT paketi različitih odašiljača međusobno ometaju iako se šalju puno brže nego u povezanom načinu rada.

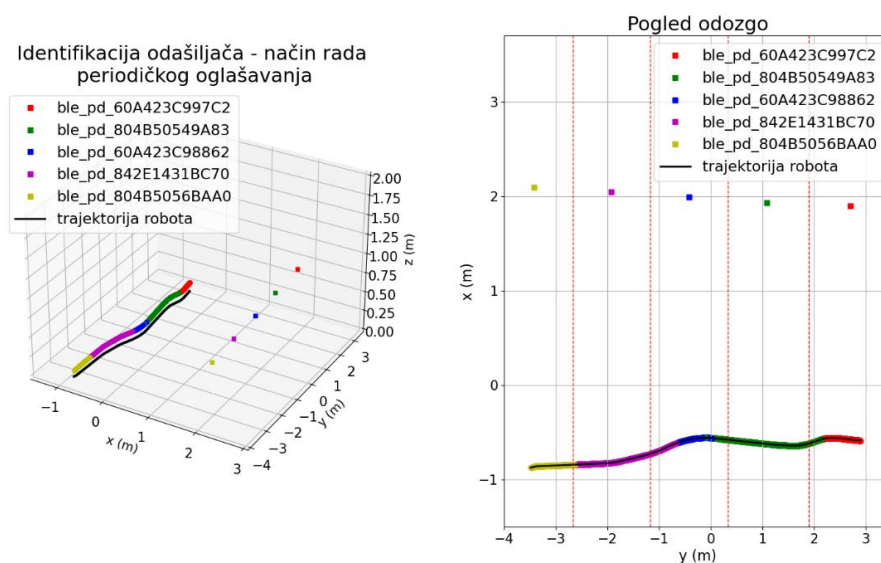
Kod prikazanog testa u načinu rada periodičkog oglašavanja algoritam je postigao točnost od 95,84%. Periodičko oglašavanje kombinira brzo slanje paketa putem oglašivačkih i podatkovnih kanala sa sinkronizacijom između odašiljača i prijavnika. Sinkronizacija je moguća jer se paketi šalju u regularnim intervalima.

Na slici 71. prikazan je dijagram prosječne točnosti testova identifikacije tagova u različitim načinima rada. Svaki test ponovljen je pet puta. Najboljim u identifikaciji pokazao se način rada periodičkog oglašavanja s prosječnom točnosti od oko 90%.



**Slika 71. Usporedba točnosti različitih načina rada kod testa identifikacije**

Na slici 72. prikazani su rezultati testa identifikacije u načinu rada periodičkog oglašavanja gdje je trajektorija robota zakrivljena. U testu je ostvareno 84,14% točnosti, što pokazuje da je periodičko oglašavanje robustan način rada koji dobro funkcionira i kod rubnih slučajeva, kao što su npr. zaobilazanje prepreka ili skretanje na kraju mola.

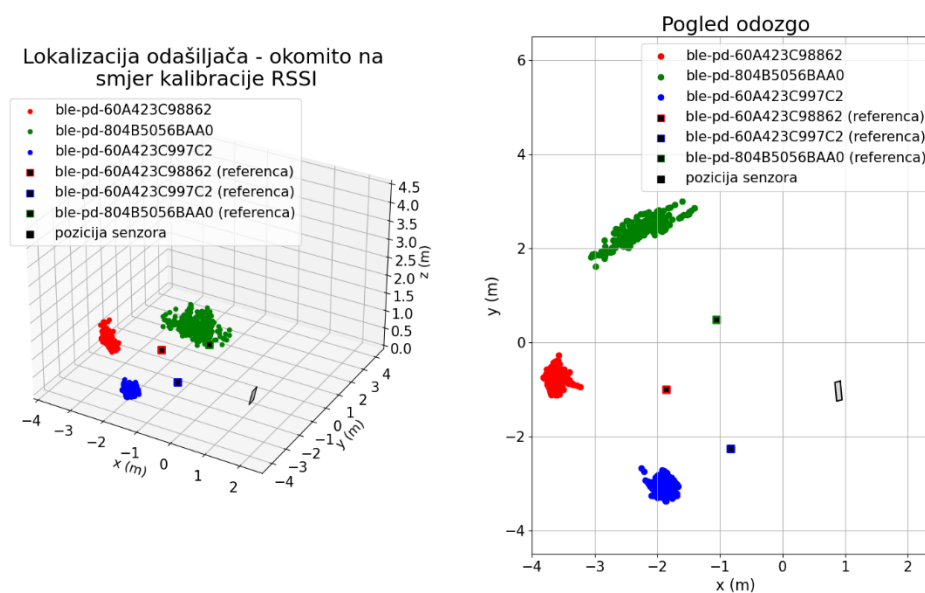


**Slika 72. Test identifikacije, način rada periodičkog oglašavanja, zakrivljena trajektorija**

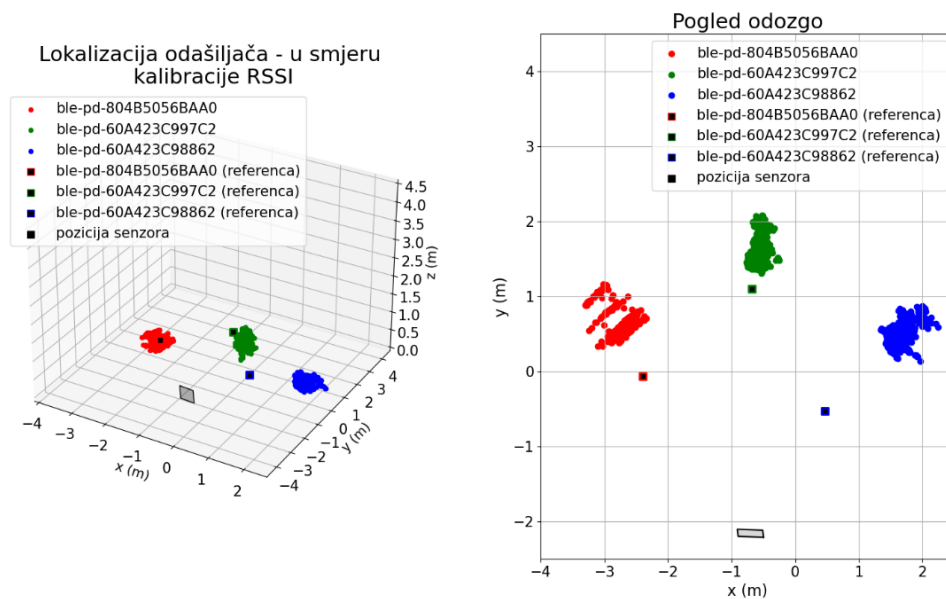
## 8.4. Mjerenje točnosti lokalizacije

U testu lokalizacije odašiljača, tri odašiljača postavljena su na nasumične točke u prostoru, međusobno udaljeni barem 1 m. Na sve odašiljače postavljeni su markeri za dobivanje referentne lokacije. Na prijammnik su također postavljena tri markera kako bi se mogao definirati njegov koordinatni sustav u prostoru. Algoritam pozicioniranja daje koordinate odašiljača u koordinatnom sustavu senzora pa je iz tog razloga potrebna transformacija izmjenjenih koordinata u koordinatni sustav *Optitrack*-a kako bi se usporedili izmjereni podaci s referencama.

Na slikama 73. i 74. prikazana su dva provedena testa lokalizacije, jedan u smjeru kalibracije RSSI, a drugi okomito na njega. Zelenim, crvenim i plavim kvadratima ispunjenim crnom bojom prikazane su referentne pozicije odašiljača u prostoru, a zelenim, crvenim i plavim krugovima estimacije njihove pozicije dobivene pomoću algoritma. Crni pravokutnik označava poziciju i orijentaciju senzora u prostoru.

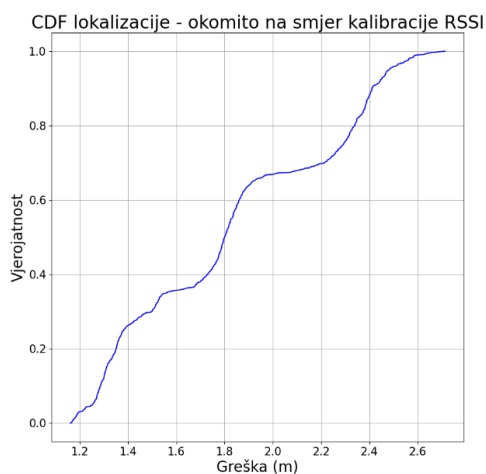


Slika 73. Test lokalizacije, smjer okomito na kalibraciju RSSI, način rada periodičkog oglašavanja

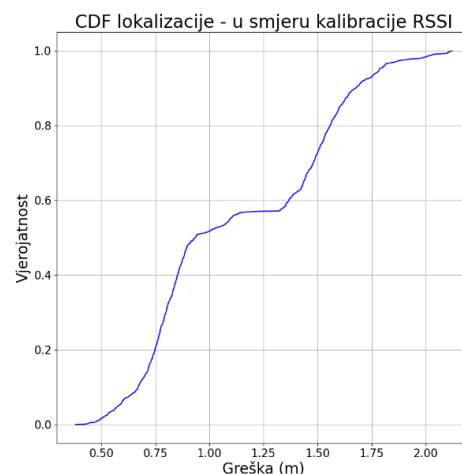


**Slika 74. Test lokalizacije u smjeru kalibracije RSSI, način rada periodičkog oglašavanja**

Kod testova lokalizacije može se primijetiti konstantna greška u estimaciji udaljenosti koja se javlja zbog znatno pojednostavljenog modela dobivenog prilagođavanjem krivulje. Zbog logaritamske prirode korištenog modela, čak i mala varijacija u izmjerenom RSSI čini veliku promjenu u estimiranoj lokaciji. U stvarnosti, relaciju između RSSI i udaljenosti vrlo je teško opisati jer osim što RSSI pada s udaljenosti, također pada i interferencijama s drugim signalima ili refleksijom od objekata. CDF grafovi (na slikama 75.a i 75.b) prikazuju da nema značajne razlike u preciznosti lokalizacije ovisno radi li se o smjeru u kojem je mjereno RSSI za dobivanje modela ili ne.



**Slika 75.a CDF graf, lokalizacija okomito na smjer kalibracije RSSI**



**Slika 75.b CDF graf, lokalizacija u smjeru kalibracije RSSI**

U tablici 11. prikazane su maksimalna pogreška, srednja vrijednost pogreške, kvadratna srednja vrijednost pogreške i standardna devijacija pogreške lokalizacije u sva tri načina rada, u oba testirana smjera.

**Tablica 11. Maksimalna pogreška, prosječna pogreška, kvadratna srednja pogreška i standardna devijacija lokalizacije**

Način rada	max. pogreška (m)	prosj. pogreška (m)	prosj. kvad. pogreška (m)	std. dev. (m)
	Okomito smjeru kalibracije RSSI			
Povezani	2,11	1,56	1,58	0,26
Nepovezani	2,89	1,59	1,69	0,56
Periodičko oglašavanje	2,71	1,83	1,88	0,43
	U smjeru kalibracije RSSI			
Povezani	1,21	0,80	0,84	0,23
Nepovezani	2,08	1,18	1,24	0,39
Periodičko oglašavanje	2,12	1,13	1,20	0,42

Iz tablice je vidljivo da u oba slučaja najmanju pogrešku lokalizacije ima povezani način rada, dok podjednake performanse imaju nepovezani način rada i način rada periodičkog oglašavanja. Ovakvi rezultati su u skladu s očekivanjima jer većina greške lokalizacije proizlazi iz RSSI, a estimirana udaljenost u testovima je veća od stvarne. Povezan način rada nije podložan interferencijama kao nepovezani način ili način periodičkog oglašavanja tako da će RSSI koji prijammnik dobije od odašiljača biti veći, stoga će udaljenost estimirana modelom biti manja, tj. u ovom slučaju bliže stvarnoj. Unatoč tome, kod sva tri načina rada javlja se velika pogreška u lokalizaciji pa je moguće zaključiti da mjerenje RSSI nije dovoljno dobar pokazatelj udaljenosti te je potrebno koristiti druge modele ili metode dobivanja udaljenosti.

### 8.5. Poboljšanja sustava

S obzirom da trenutni sustav lokalizacije nije dostatan za zadanu primjenu, u ovom poglavlju istražiti će se njegova moguća poboljšanja. Glavna limitacija trenutnog sustava je način određivanja udaljenosti i nemogućnost validacije i ispravljanja pogrešaka mjerenja u realnom vremenu.

Prvi način za poboljšanje sustava je korištenje dva ili više prijammnika na robotu. Sustavi lokalizacije pomoću BLE tehnologije u stvarnim primjenama sadrže barem tri ili više lokatora i vrše triangulaciju. Zbog toga nema potrebe koristiti mjerenje RSSI za udaljenost jer je pozicija

odašiljača već određena. Korištenjem više lokatora moguće je i trenutno ispraviti pogrešku mjerenja. Ako jedan prijamnik javlja rezultat koji se značajno razlikuje od ostalih, taj rezultat se može smatrati neispravnim i ignorirati. Glavni problem korištenja više prijamnika na robotu su fizičke limitacije. Obično se prijamnici postavljaju u različite kutove prostorije kako bi se njihovi kutevi (tj. pravci koje tvore kutovi) presijecali. Na taj način moguće je dobiti poziciju na točki presjeka. Na robotu bi prijamnici bili postavljeni paralelno i vrlo blizu jedan uz drugog pa bi šumovi u mjerenjima kutova ponekad prouzročili paralelnost pravaca, što bi zatim uzrokovalo veliku pogrešku ili slučaj kada se pravci uopće ne presjecaju. S druge strane, sličan sustav s dva prijamnika međusobno udaljenih 0,4 m predložen je i testiran u istraživanju Shu, W. i sur. [69] te je postigao znatno manju pogrešku od trenutnog sustava testiranog u ovom radu.

Drugi način mogućeg poboljšanja je korištenje preciznije metode za određivanje udaljenosti, kao što je ToF ili novi BT *channel sounding*. Za precizne izračune udaljenosti na temelju ToF metode potreban je bolji hardver. Zbog brzine propagacije radiovalova, koja je približna brzini svjetlosti, za točnost pozicioniranja od 30 cm potreban je takt procesora od barem 1 GHz [70]. Trenutno odabrani EFR32BG22 ima takt 76,8 MHz, što je dva reda veličine manje od potrebnog. *Bluetooth channel sounding* nova je tehnologija za precizno određivanje udaljenosti čija je preliminarna specifikacija objavljena u lipnju 2023. [71]. Ova tehnologija koristi metodu računanja udaljenosti pomoću faze signala (PBR – *engl. Phase Based Ranging*). U ovoj metodi odašiljač šalje više signala različitih frekvencija, a prijamnik zatim na temelju razlike u fazi i u frekvenciji tih signala može estimirati udaljenost. BT *channel sounding* još je u fazi razvoja pa još ne postoji dovoljno dostupnog hardvera na tržištu za njegovu implementaciju i testiranje.

Treći način poboljšanja lokalizacije je korištenje kompleksnijeg matematičkog modela za računanje udaljenosti pomoću RSSI. Jedan takav model, prikazan u istraživanju Xu, J. i sur. [62] koristi izmjerene varijance RSSI na različitim udaljenostima kako bi se kompenzirao šum u signalu pomoću funkcije pogreške. Ovaj model dinamički podešava koeficijente  $A$  i  $\eta$  te koeficijente funkcije pogreške u realnom vremenu s obzirom na promjenu okoline, međutim također zahtijeva i puno više procesorske snage. Drugi pristup rješavanju problema lokalizacije je koristeći strojno učenje. Dvoslojna *feedforward* neuronske mreže s izmjerenim vrijednostima RSSI kao ulazima u mogućnosti je estimirati traženu udaljenost s relativnom preciznosti manjom od 1 m (na prostoru od 6x5 m), kako je pokazano u istraživanju Milano, F. i sur. [72]. Naposljetku, promjena okoline mjerenja također će utjecati na točnost lokalizacije. Zatvoreni prostori kao što je laboratorij CRTA sadrže mnoštvo različitih objekata od kojih se signal

---

reflektira stvarajući *multipath* efekt te veliku količinu drugih bežičnih signala (WiFi, BT, razni senzori) koji tvore interferenciju jer također funkcioniraju u 2,4 GHz pojasu.



## 9. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražene su razne bežične tehnologije, mogućnosti identifikacije i lokalizacije pomoću bežičnih tehnologija te je pobliže opisana *Bluetooth Low Energy* bežična tehnologija. Prikazani su neki od aktualnih algoritama traženja smjera i testirana je te validirana identifikacija i lokalizacija odašiljača pomoću prijarnika odabranog hardvera kompanije *SiliconLabs*. Testiranje je izvršeno u sklopu razvoja robotskog sustava za identifikaciju i lokalizaciju brodova u marini. Lokalizacija pomoću bežičnih tehnologija, pogotovo u zatvorenim prostorima gdje je GPS signal onemogućen tema je mnogih aktualnih istraživanja. Mnogi sustavi za lokalizaciju sadrže tri ili više prijarnika fiksiranih u prostoru, ali u ovom radu testirano je jeftinije rješenje koristeći jedan mobilni prijarnik montiran na robota.

Rezultati su pokazali da je ovakav sustav dostatan za identifikaciju odašiljača, ali zbog velike pogreške u pozicioniranju ne zadovoljava kod njihove lokalizacije. Glavna greška javila se kod mjerenja udaljenosti odašiljača od prijarnika pomoću RSSI. Ta mjerenja pokazala su se visoko varijantnima zbog kompleksne povezanosti RSSI i udaljenosti, ali i okruženja testiranja koje je uzrokovalo visoki šum. U radu je u poglavlju 8.5. također predloženo nekoliko potencijalnih rješenja i poboljšanja za buduću implementaciju i validaciju.

U trenutku istraživanja, mobilni robot koji će u budućnosti obnašati zadatak identifikacije i lokalizacije brodova u marini još nije bio proizveden pa je iz tog razloga korišten dostupni ASTRO mobilni robot. Unatoč tome, ovo istraživanje provedeno je na način da sustav bude kompatibilan sa svim robotima koristeći ROS2 standardne poruke. Svejedno, nakon što se spomenuti prototip mobilnog robota proizvede, bit će potrebno ponovo testirati poboljšanu verziju ovog sustava.

## LITERATURA

- [1] <https://collections.museumsvictoria.com.au/items/404170>, 7.7.2024.
- [2] <https://bostondynamics.com/news/boston-dynamics-expands-global-sales-of-spot-robot/>, 7.7.2024.
- [3] <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>, 7.7.2024.
- [4] T. Savić, K. Brun-Laguna, T. Watteyne, Blip: Identifying Boats in a Smart Marina Environment, *19th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT)*, lipanj 2023.
- [5] R. Prasad, M. Ruggieri, *Technology Trends in Wireless Communications*, Artech House, London, 2003.
- [6] F. Ahmed, M. Phillips, S. Phillips, K.Y. Kim, Comparative Study of Seamless Asset Location and Tracking Technologies, *30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021)*, 15-18 lipanj 2021.
- [7] M. Danciu, T. Alexa-Stratulat, C. Stefanescu, G. Dodi, Terahertz Spectroscopy and Imaging: A Cutting-Edge Method for Diagnosing Digestive Cancers, *Materials*, 12(9):1519, svibanj 2019.
- [8] A. Q. Khan, M. Riaz, A. Bilal, Various Types of Antenna with Respect to their Applications: A Review, *International journal of multidisciplinary sciences and engineering*, ožujak 2016.
- [9] M. Dhillon, S. Kumar, Performance Analysis and Comparison of various Rectenna based RF Energy Harvesting Systems, Carleton University, prosinac 2017.
- [10] <https://www.mathworks.com/help/antenna/gs/antenna-radiation-patterns.html>, 4.6.2024.
- [11] R. Parthasarathy, T. Ramachandran et. al., Performance Analysis and Comparison of Wireless Protocols Standards in WPAN-Bluetooth and WLAN-Wi-Fi, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 1472-1482, prosinac 2014.
- [12] A. Mariakakis, J. Lee, S. Sen, K. H. Kim, SAIL: Single Access Point-Based Indoor Localization, *MobiSys '14: Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile Systems, Applications and Services*, lipanj 2014.
- [13] R. Want, An introduction to RFID technology, *IEEE Pervasive Computing*, veljača 2006.
- [14] M. Archana, S. S. Raju, D. Preethi, et. al., Smart Automated Parking System using IoT, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Computing and Data Communication Systems*, 2023.
- [15] A. Diallo, Z. Lu, X. Zhao, Wireless Indoor Localization Using Passive RFID Tags, *The 16th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC)*, kolovoz 2019.
- [16] S. Šafarić, K. Malarić, ZigBee Wireless Standard, *48th International Symposium ELMAR-2006*, lipanj 2006.

- [17] G. Goncalo, S. Helena, Indoor Location System using ZigBee Technology, *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2009.
- [18] R. Krmpetić, D. Oletić, V. Bilas, Wireless Sensor Network for Berth Supervision in Marinas, *2012 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, veljača 2012.
- [19] S. Devalal, A. Karthikeyan, LoRa Technology – An Overview, *Proceedings of the 2nd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA 2018)*, 2018.
- [20] E. Mackensen, M. Lai, et. al., Bluetooth Low Energy (BLE) Based Wireless Sensors, *Sensors*, 2012.
- [21] <https://novelbits.io/bluetooth-long-range-coded-phy/>, 7.6.2024.
- [22] F. Milano, H. da Rocha, et. al., BLE-Based Indoor Localization: Analysis of Some Solutions for Performance Improvement, *Sensors*, siječanj 2024.
- [23] M. Woolley, Bluetooth Core Specification v5.1: Feature Overview, *Bluetooth SIG*, 28. siječnja 2019.
- [24] Y. Rahayu, T. A. Rahman, et. al., Ultra Wideband Technology and its Applications, *Wireless and Optical Communications Networks*, 2008.
- [25] L. T. Wang, Y. Xiong, M. He, Review on UWB Bandpass Filters, *UWB Technology – Circuits and Systems*, Intech Open, srpanj 2019.
- [26] R. Fontana, Recent Advances in Ultra Wideband Communications Systems, *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (UWBST)*, svibanj 2002.
- [27] <https://www.apple.com/>, 10.6.2024.
- [28] T. Wang, H. Zhao, Y. Shen, An Efficient Single-Anchor Localization Method Using Ultra-Wide Bandwidth Systems, *Applied Sciences*, 2020.
- [29] F. Ye, R. Chen, et. al., A Low-Cost Single-Anchor Solution for Indoor Positioning Using BLE and Inertial Sensor Data, *IEEE Access*, 2019.
- [30] L. Bolter, M. Spörk, et. al., Direction Finding with UWB and BLE: A Comparative Study, *17th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, 2020.
- [31] R. Tei, H. Yamazawa, T. Shimizu, BLE Power Consumption Estimation and its Applications to Smart Manufacturing, *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 2015.
- [32] <https://www.u-blox.com/en/product/xplr-aoa-1-kit>, 10.6.2024.
- [33] <https://www.themobileknowledge.com/product/mk-uwb-kit-sr150-sr040/>, 10.6.2024.
- [34] <https://www.ubitrack.com/collections/tags>, 10.6.2024.
- [35] <https://www.feasycom.net/beacon/battery-beacon/200m-bluetooth-5-0-ble-beacon-fsc-bp104.html>, 10.6.2024.
- [36] <https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-le-channel-selection-algorithms.html>, 28.3.2024.

- [37] [https://www.youtube.com/watch?v=tnAuR6A\\_hfA](https://www.youtube.com/watch?v=tnAuR6A_hfA), 10.6.2024.
- [38] UG103.14: Bluetooth® LE Fundamentals, *Silicon Labs*, Rev. 0.7
- [39] <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/>, 11.6.2024.
- [40] Bluetooth Special Interest Group (SIG), Bluetooth Core Specification, verzija 5.4., <https://www.bluetooth.com/>
- [41] [https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-packet-structure.html#mw\\_a3c3f34d-47e4-4b1f-ab96-1a66a338c335](https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-packet-structure.html#mw_a3c3f34d-47e4-4b1f-ab96-1a66a338c335), 12.6.2024.
- [42] UG103.18: Bluetooth® Direction Finding Fundamentals, *Silicon Labs*, Rev. 0.2
- [43] I. Blair, J. Salokannel, M. Batra, et. al., Constant Tone Extension Service, *Bluetooth SIG*, rev v1.0 12.01.2021, <https://www.bluetooth.com/specifications/ctes-1-0/>
- [44] <https://www.chem.ucla.edu/~harding/IGOC/W/wavelength.html>, 13.6.2024.
- [45] R. Lyons, Quadrature signals: Complex, but not complicated, *IEEE Long Island*, 2008. [https://www.ieee.li/pdf/essay/quadrature\\_signals.pdf](https://www.ieee.li/pdf/essay/quadrature_signals.pdf)
- [46] Z. Chen, G. Gokeda, Y. Yu, Introduction to Direction-of-Arrival estimation, *Artech house*, 2010.
- [47] P. Gupta, S. P. Kar, MUSIC and Improved MUSIC algorithm to Estimate Direction of Arrival, *IEEE ICCSP conference*, 2015.
- [48] <https://www.dusuniot.com/>, 18.6.2024.
- [49] <https://www.silabs.com/development-tools/wireless/bluetooth/bgm22-pro-kit?tab=overview>, 18.6.2024.
- [50] <https://www.nordicsemi.com/Products/Wireless/Bluetooth-Low-Energy>, 18.6.2024.
- [51] <https://www.corehw.com/products/antenna-array-ant1/>, 18.6.2024.
- [52] <https://hr.mouser.com/ProductDetail/u-blox/XPLR-AOA-3?q=sGAEpiMZZMuqBwn8WqcFUipNgoezRlc4nOIJ4b90PsF%2FdLJKxFEv1A%3D%3D>, 19.6.2024.
- [53] UG573: Si-MB4002A Wireless Pro Kit Mainboard User's Guide, *Silicon Labs*, Rev. 1.0
- [54] EFR32BG22 Wireless Gecko SoC Family Data Sheet, *Silicon Labs*, Rev 1.1
- [55] UG531: BRD4191A BG22 Direction Finding Radio Board User's Guide, *Silicon Labs*, Rev 1.0
- [56] AN1195: Antenna Array Design Guidelines for Direction Finding, *Silicon Labs*, Rev 0.4
- [57] <https://www.silabs.com/development-tools/thunderboard/thunderboard-bg22-kit?tab=overview>, 21.6.2024.
- [58] <https://www.silabs.com/development-tools/wireless/bluetooth/bgm220-explorer-kit?tab=overview>, 21.6.2024.
- [59] UG465: BGM220 Explorer Kit User's Guide, *SiliconLabs*, Rev 1.0
- [60] AN1259: Using the Silicon Labs Bluetooth® Stack v3.x and Higher in Network Co-Processor Mode, *SiliconLabs*, Rev 1.4
- [61] [https://github.com/ika-rwth-aachen/mqtt\\_client](https://github.com/ika-rwth-aachen/mqtt_client), 21.6.2024.

- 
- [62] J. Xu, W. Liu, et. al., Distance Measurement Model Based on RSSI in WSN, *Wireless Sensor Network*, kolovoz 2010.
- [63] <https://byjus.com/maths/spherical-coordinates/>, 26.6.2024.
- [64] <https://github.com/nino192/Marinero-Localization>, 26.6.2024.
- [65] J. Rodas, C. J. Escudero, et. al., Multiple Antennas Bluetooth System for RSSI Stabilization, *ISWCS*, rujan 2007.
- [66] J. Wisanmongkol, L. Klinkusoom, et. al., Multipath Mitigation for RSSI-Based Bluetooth Low Energy Localization, *19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2019.
- [67] T. Knežević, Application of imitation learning in human-robot interactions, Diplomski rad, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.
- [68] <https://scipy.org/>, 2.7.2024.
- [69] W. Shu, S. Wang, A Indoor Positioning System of Bluetooth AOA Using Uniform Linear Array Based on Two-point Position Principle, *IEEE Sensors Journal*, lipanj 2022.
- [70] D. Giovanelli, E. Farella, RSSI or Time-of-flight for Bluetooth Low Energy based localization? An experimental evaluation, *11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, rujan 2018.
- [71] <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/channel-sounding-cr-pr/>, 3.7.2024.
- [72] F. Milano, H. da Rocha, M. Laracca, et. al., BLE-Based Indoor Localization: Analysis of Some Solutions for Performance Improvement, *Sensors*, siječanj 2024.